



Elias Hosseini

Hybridilämmitystekniikka rakennuksissa: Tapaustutkimuskoh- teena Kalaholman ala-aste

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 27.05.2019

Valvoja: Professori Markku Virtanen

Ohjaaja: Ilkka Råman

Tekijä Elias Hosseini

Työn nimi Hybridilämmitystekniikka rakennuksissa: Tapaustutkimuskohteena Kalaholman ala-aste

Maisteriohjelma Energy Technology

Koodi ENG21

Työn valvoja Professori Markku Virtanen

Työn ohjaaja(t) DI Ilkka Råman

Päivämäärä 27.05.2019

Sivumäärä 68+3

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Hybridilämmitystekniikka on vaihtoehtoinen ympäristöystävällinen energiatuotantomuoto rakennuksissa, missä on mahdollisuutena ja suotavaa hyödyntää paikallisia energiatuotantojärjestelmiä. Hybriditekniikan edut itsenäisiin lämmöntuotantojärjestelmiin ovat niiden säädettävyyden, ja potentiaalinen mahdollisuus täysin omavaraiseen energiatuotantoon.

Hybridijärjestelmien mallintamien on tärkeässä osassa ennen järjestelmän käyttöönottoa. Mallinnus tulee tehdä aina rakennuskohtaisesti käyttäen rakennuksen sijainnista ja käyttötarkoituksesta riippuvia parametrejä. Rakennuksen mallinnuksessa, riippumatta onko kyseessä olemassa oleva rakennus vai uudiskohde, tulisi hybridijärjestelmien toimivuuden analysoinnissa ensisijaisesti varmistaa, että rakennuksen malli on lähtökohtaisesti realistinen.

Tämä diplomityö tutkii hybridijärjestelmien hyödyntämistä rakennuksen mittakaavalla. Tutkimus tehtiin yhteistyössä LVI-Insinööritoimisto Vahvaconin kanssa. Tapaustutkimuskohteeksi on valittu Porissa sijaitseva Kalaholman Ala-aste.

Kalaholman koulun uhkana on sen purkaminen Porin kaupungin uusiessa kouluverkkojaan. Yhdeksi purkamisen syyksi on esitetty koulujen tarve uudistua. Kalaholman koulussa on käytössä tällä hetkellä öljykattilalämmitysjärjestelmä, mitä ainakin välillisesti pidetään vanhanaikaisena.

Tämän työn ohessa Kalaholman koulun ala-asteelle suunniteltiin Ilmavesilämpöpumppukattilahybridilämmitysjärjestelmä asiakkaan toimesta. Järjestelmän tavoitteena on pienentää ala-asteen öljynkulutusta, sekä mahdollisesti myös öljyn käytöstä aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä.

Tässä työssä koulurakennus mallinnetaan käyttäen MagiCAD-Room, sekä IDA-ICE-ohjelmistoa. Mallinnuksen pohjalta laskettiin vuosittainen säästö kohteessa, sekä päästövähennykset. Säästöjen pohjalta investoinnista tehtiin kannattavuuslaskelma käyttäen kahta menetelmää: takaisinmaksu- sekä nykyarvomenetelmää.

Rakennuksen mallinnuksen pohjalta saatujen säästöjen, sekä kannattavuuslaskelmien perusteella järjestelmä osoittautui hyvin kannattavaksi, sillä sen takaisinmaksuaika oli molemmilla menetelmillä tarkastellessa alle kolme (3) vuotta.

Avainsanat Hybriditekniikka, paikallinen energiantuotanto, päästövähennykset.

Author Elias Hosseini

Title of thesis Hybrid heating systems in buildings: A case study of Kalaholma elementary

Master programme Energy technology

Code ENG21

Thesis supervisor Professor Markku Virtanen

Thesis advisor(s) M.Sc. (Tech.) Ilkka Råman

Date 27.05.2019

Number of pages 68+3

Language Finnish

Abstract

Hybrid heating technology is an alternative environmentally friendly energy production system in buildings where the usage of local energy production is possible and feasible. The benefits of hybrid heating technology are its controllability and adjustability plus the possibility for full independent energy production.

Modelling hybrid systems is a vital part before installing any new systems. Modelling should always be done to an individual building using variables that are distinctive to the location and for purpose the building is used. Whether the building modeled is new or old one should first make sure that the model is realistic and gives realistic output before analyzing any hybrid systems.

The thesis in this work is to inspect the usage of hybrid heating systems on a building scale. The research is done in concert with LVI-engineering office Vahvacon Oy. The case study in this thesis is the Kalaholma elementary school in Pori Finland.

Kalaholma elementary is set to be demolished since city of Pori is redefining its school network. One of the reasons for demolition is the general need to renew schools. Kalaholma elementary is using an oil burner as a heat source which is thought at least indirectly as an old-fashioned system.

In junction with this study designs for air-to-water heat pump and boiler hybrid system was designed ordered by the school. The system is hoped to diminish the oil consumption in the school and possibly reduce the CO₂ emissions.

In this study the school building is modeled using MagiCAD-Room and IDA-ICE softwares. Based on the modelling the annual savings in the school were calculated with the emission reductions. Based on the savings LCC calculations for the investment were conducted using two methods: the buyback and net present value method.

Based on the analyzed methods the designed systems had a buyback time of 2 -3 years making it highly profitable.

Keywords Hybrid Technology local energy production emission reduction

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Sisällysluettelo	3
Merkinnät	3
Lyhenteet	4
1 Johdanto	5
1.1 Työn tavoitteet	6
1.2 Työn tutkimusmenetelmät	6
1.3 Työn rajaukset ja rajoitukset	7
1.4 Tapauskohtaisen tutkimuskohteen valinnan perusteet	8
2 Tausta	9
2.1 Suomen ilmastotavoitteet	9
2.2 Porin kunta	10
2.2.1 Porin energiantuotanto ja kulutus	11
2.2.2 Porin kaupungin ilmastotavoitteet	11
2.3 Kalaholman ala-aste	12
2.3.1 Kalaholman koulun lämmitysjärjestelmät	13
2.3.2 Kalaholman koulun energiankulutus	14
2.3.3 Kalaholman koulun energiantuotanto tulevaisuudessa	15
3 Paikalliset energiantuotantojärjestelmät	16
3.1 Paikallisten energiantuotantojärjestelmien käyttö energiantuotannossa	17
3.2 Hybriditeknikka	19
3.3 Hybriditeknikkajärjestelmän kuvaus	20
3.4 Polttoainepohjaiset hybridijärjestelmät	21
3.4.1 Lämpöpumppu- kattilajärjestelmä	21
3.4.2 Sähkövastus- kattilahybridijärjestelmä	23
3.4.3 Aurinkopaneeli- kattilahybridijärjestelmä	24
3.5 Uusiutuvaa energiaa hyödyntävät hybridijärjestelmät	25
3.5.1 Hybridi aurinkopaneelijärjestelmät	26
3.5.2 Lämpöpumppu- sähkövastushybridijärjestelmä	27
3.5.3 Aurinkopaneeli- lämpöpumppuhybridijärjestelmä	27
4 Hybridijärjestelmien analyysimenetelmät	29
4.1 Simulointiohjelmat	29
4.1.1 MagiCAD Room ohjelmisto	29
4.1.2 Indoor Climate and Energy IDA-ICE	30
4.2 Elinkaarianalyysi	30
4.2.1 Takaisinmaksuaika	31
4.2.2 Nykyarvomenetelmä	32
5 Kalaholman koulun mallinnus	32
5.1 Koulurakennuksen mallinnus	33
5.1.1 Ulkoiset- sekä järjestelmän mitoituslämpötilat	33
5.1.2 Tilojen mitoitusparametrit	34
5.2 Hybridilämmitysjärjestelmien mitoitusparametrit	35
5.2.1 Ilmavesilämpöpumpun mitoitus	35
5.2.2 Maalämpöpumpun tehon mitoitus	35
5.2.3 Aurinkopaneelien mitoitus	38
5.3 Koulurakennuksen mallin luominen	39

5.3.1	Koulurakennuksen luonti MagiCAD-Room-mallilla.....	39
5.3.2	IDA-ICE ohjelmiston käyttö olosuhde- ja energiamallintamiseen	40
6	Ratkaisuvaihtoehtojen analysointi	41
6.1	Öljylämmitysjärjestelmä	42
6.1.1	Öljylämmityksen kustannukset	43
6.1.2	Öljylämmityksen ympäristövaikutukset	45
6.2	Ilmalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmä	45
6.2.1	Ilmavesilämpöpumppu -kattilahybridijärjestelmän kustannukset.....	47
6.2.2	Ilmavesi-öljyhybridilämmityksen ympäristövaikutukset.....	48
6.3	Maalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmä	49
6.3.1	Maalämpöpumppu-kattilahybridijärjestelmän kustannukset	51
6.3.2	Maalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmän ympäristövaikutukset.....	51
6.4	Aurinkopaneeli- maalämpöpumppukattilahybridijärjestelmä	51
6.4.1	Aurinkopaneeli-maalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmän kustannukset	53
6.4.2	Aurinkopaneeli- maalämpöpumppukattilahybridijärjestelmän ympäristövaikutukset	54
6.5	Ilmavesilämpöpumppujärjestelmän kannattavuuslaskenta	54
7	Johtopäätökset.....	56
7.1	Yhteenveto analyysituloksista	56
7.2	Virheiden analysointi	57
8	Yhteenveto	58
	Lähdeluettelo	60
	Liiteluettelo	64

Merkinnät

A	Pinta-ala (m ²)
A _k	Vuosittainen säästö (€)
C _{CO2}	Öljyn hiilidioksidimäärä (tonneissa) /öljylitra (t CO ₂ /TJ)
E	Energia (kWh/GWh)
I ₀	Investoinnin hinta (€)
I _k	Investointikustannukset vuoden k lopussa (€)
I _r	Säteily määrä (kWh/m ²)
K _k	Järjestelmän käytön vuosittaiset kulut (€)
N	Vuosi (yr)
N _I	Investoinnin käyttöikä
N	Takaisinmaksuaika (yr)
N _I	Investoinnin elinikä (yr)
P	Teho (kW)
Q _ö	Öljyn energiasisältö (kWh/l)
S	Investoinnin jäännösarvo viimeisenä vuonan (€)
T	Lämpötila (°C)
T _k	Järjestelmän uusimisesta syntyvät vuosittaiset säästöt (€)
V̇	Tilavuusvirta (m ³ /s)
f _e	Eskaloitumisaste (%)
i	Korkotaso (%)
k	Vuosi (yr)
l	Litra (dm ³)
r _e , r	Todellinen korkotaso (%)
ρ _ö	Öljyn tiheys (kg/dm ³)

Lyhenteet

BIM	Building Information Modeling
CHP	Combined Heat And Power
COP	Coefficient Of Performance
GRHP-B	Hybrid Ground Source Heat Pump And Boiler
PPHJ	Polttoainepohjaiset Hybridijärjestelmät
IV	Ilmanvaihto
HP-B	Hybrid heat Pump And Boiler
HB-R	Hybrid boiler and resistor
LCC	Life Cycle Calculation
NPV	Net Present Value
PPHJ	Polttoainepohjaiset Hybridijärjestelmät
PVT	Photovoltaic And Thermal
PV	Photovoltaic
SHAP	Solar Assisted Heat Pump
SAHP-B	Hybrid Solar Assisted Heat Pump And Boiler
UHJ	Uusiutuvaa energiaa hyödyntävät Hybridijärjestelmät
tn	Tonni

1 Johdanto

Globaali työmäärä ilmastonmuutoksen ehkäisemiseksi on pakottanut päästöjä aiheuttavien toimialojen muuttamaan ja kehittämään toimintakäytäntöjään tulevaisuutta vasten. Energiasektorin kehittämisen merkitys on yksi suurimpia myötävaikuttajia vihreämmän ja puhtaamman energiatuotannon yleistymiselle maailmassa, sen ollessa ylivoimaisesti suurin päästöjen aiheuttaja. Energiasektorin mukauttaminen ja muuttaminen on kuitenkin kallista ja tahottoman hidasta suhteessa siihen, kuinka nopeasti ratkaisuja tulisi tehdä, jotta ilmastonmuutosta saataisiin hillittyä.

Erityisesti lämmöntuotannon osalta suuret rakenteelliset muutokset ovat usein liian kalliita ja vaikeita toteuttaa riittävän lyhyellä aikavälillä, jotta päästöjä saataisiin pienennettyä. Fossiilisten polttoaineiden käytöstä vapautuvaa energiamäärää ei pystytä nopeasti tai edullisesti korvaamaan yhtä vakaalla ja päästöttömällä energiamuodolla. Osana ratkaisua voisivat olla niin kutsuttu paikallinen energiantuotanto, missä energia ja lämpö tuotetaan suoraan käyttökohteessa ainakin osittain (Reda & Laitinen, 2015).

Paikallisia fossiilista polttoaineita käyttäviä lämmitysjärjestelmiä, on ollut Suomessa käytössä jo vuosia, mutta vasta viime vuosikymmenen vaihteesta eteenpäin, myös uusiutuvaa energiaa käyttäviä järjestelmiä on otettu käyttöön enimmäkseen määrin (Laitinen, ym., 2014). Näistä ylivoimaisesti suosituimpia ovat olleet erinäiset lämpöpumput.

Lämpöpumput riippumatta lämmöntuotantotavasta, eivät usein kuitenkaan riitä kattamaan koko rakennuksen lämmöntarvetta, joten jäljelle jäänyt lämmöntarve tuotetaan tyyppillisesti sähköllä, tai kaukolämmöllä. Tämä tekee rakennuksesta riippuvaisen ulkopuolisesta energianlähteelle, joista yhä valitettavasti iso osuus tuotetaan edelleen fossiililla polttoaineilla.

Hybridilämmitysjärjestelmät voisivat tuoda ratkaisuja edellä mainittuihin ongelmiin, erityisesti nopealla aikavälillä ja kohtuullisen edullisella investoinnilla. Hybriditekniikkaa voitaisiin mahdollisesti hyödyntää myös olemassa olevissa fossiilisia polttoaineita käyttävissä järjestelmissä, pienentäen niiden polttoaineen kulutusta ja samalla vähentäen lämmityksestä aiheutuvia päästöjä.

Hybridilämmitysjärjestelmien analysointi on aina tapauskohtaista, eikä se sellaisenaan skaalautu alue- tai rakennuskohtaisesti. Tämän seurauksena järjestelmien toimivuutta on syytä tutkia tapauskohtaisesti ottaen huomioon käyttökohteessa olevat parametrit, kuten rakennuksen käyttötarkoitus ja ympäröivät olosuhteet.

Tämän työn aiheena on hybridijärjestelmien hyödyntäminen rakennusten lämmön tuotannossa, niiden kannattavuus sekä niiden rooli ilmastonmuutoksen ehkäisemisessä. Työssä tarkastellaan hybriditekniikoita teorian ja aikaisempien tutkimustulosten perusteella, sekä tapauskohtaisesti erään Suomalaisen Porissa sijaitsevan Kalaholman ala-asteen osalta.

Kalaholman koulurakennus on suunniteltu purettavaksi, ja sen kohtalo on avoinna sen ollessa osana Porin kaupungin hanketta uudistaa koulutoimintaa Porin seudun alueella, mikä tekee siitä mielenkiintoisen tutkimuskohteen erityisesti hybriditekniikoiden kannattavuuden tarkastelun osalta.

1.1 Työn tavoitteet

Tämän diplomityön tarkoitus on selvittää mahdollisia yleisesti käytössä oleva hybridijärjestelmiä, ja kuinka hyvin kyseisten järjestelmien käyttö sopii rakennusten mittakaavassa rakennusten lämmöntuotantoon. Lisäksi tarkoituksena on selvittää tapauskohtaisesti kolmen eri järjestelmän toimivuutta mallintamalla Kalaholman ala-asteen koulurakennus ja simuloimalla koulurakennuksen vuoden aikaisia olosuhteita.

Tämän työn keskeisimpiä tutkimuskysymyksiä ovat:

- Mitä hybridilämmitysjärjestelmiä on mahdollista hyödyntää rakennusten mittakaavassa?
- Kuinka hybridijärjestelmät toimivat teoriassa Porissa sijaitsevassa Kalaholman ala-asteella
- Kuinka kannattava todellinen hybridilämmitysjärjestelmä on?

1.2 Työn tutkimusmenetelmät

Työssä on pyritty ratkaisemaan edellä mainittuja tutkimuskysymyksiä seuraavilla menetelmillä.

- Hybriditekniikan teoriaa tarkastellaan alan julkaisujen ja tieteellisten artikkelien pohjalta, joiden perusteella tehdään linjauksia järjestelmien toimivuudesta.
- Olemassa olevasta koulurakennuksesta luodaan tilamalli MagiCAD Room -ohjelmistolla.
- Mallin pohjalta ja olemassa olevien tietojen perusteella perusteella selvitetään rakennuksen energiankulutus IDA-ICE -simulointiohjelmistolla.
- IDA ICE -simulointiohjelmalla analysoidaan kolmea eri hybridijärjestelmää ja niiden käytöstä saatuja energiasäästöjä.
- Mallituksen pohjalta tehdään ennalta valitulle järjestelmälle LVI-suunnitelmat, joita hyödynnetään tässä työssä.
Teorian ja mallintamisesta saatujen tulosten perusteella analysoidaan valittuja hybridijärjestelmiä ja niiden hyötyjä/haittoja taloudellisesta, sekä ympäristöpäästöjen näkökulmasta.
- Arvioidaan tutkimuksen hyötyjä/haittoja sekä mahdollisia virheitä, sekä ehdotetaan mahdollisia jatkotutkimuskohteita.

Teoriatutkimus tehdään tutustumalla paikallisten energiatuotantomuotojen ja erityisesti hybridijärjestelmien teoriaan. Teoriatarkastelua varten lähteinä käytetään alan lehtiä, aikaisempia vastaavia tutkimuksia sekä tietokirjoja. Teoriatarkastelua tehdään omaa tutkimuskohdetta silmällä pitäen, ja siitä pyritään rajaamaan pois tämän työn kannalta epäolennaiset asiat.

Vastaavista järjestelmistä on tehty tutkimusta käyttötarkoitukseltaan erilaisista rakennuksista (Jeong;Gyung Yu;& Nam, 2017), (Manolis;Nektarios;Giorgos;& Angeliki, 2018) ja (Frisk, 2017) toimesta. Näitä ja muita tutkimusraportteja pyritään hyödyntämään ainoastaan teorian osalta, millä varmistetaan se, että tämän työn tutkimus ei ole lähtökohtaisesti puolueellinen.

Rakennus mallinuksessa käytetään mahdollisimman tarkkoja arvoja saatujen tietojen perusteella. Mallinukseen ei kuitenkaan paneuduta liikaa, ja malli pyritään pitämään yksinkertaisena, jotta mahdollistetaan myöhempien laskentaohjelmien toimintavarmuus. Mallinuksessa käytetään ilmamäärien, rakennusosien ja käyttöasteiden osalta todellisia saatuja tietoja rakennuksesta ja sen käytöstä. Mikäli tietoa ei ole saatavilla, käytetään sovelletusti vanhoja sekä uusia rakennusmääräyksiä. Mallinnusmenetelmät, mallinnusohjelmat ja lähtötietojen valintaperiaatteet ovat esiteltynä tämän työn luvussa 5.

Saatuja tutkimustuloksia vertaillaan keskenään ja erikseen, jonka pohjalta muodostetaan päätelmä siitä, onko järjestelmien käyttöönotto kyseisessä rakennuksessa energiakulutuksen tai ympäristöpäästöjen vähentämisen kannalta oikeutettua, ja kuinka paljon mahdollisia säästöjä voidaan aikaan saada.

Tutkimustuloksilla on tarkoitus osoittaa, kuinka kannattavaa hybriditekniikoiden hyödyntäminen käyttökohteissa mahdollisesti on. Lisäksi tavoitteena on tutkia, kuinka hyvin valittujen hybriditekniikoiden mallintaminen onnistuu valituilla käyttöohjelmistoilla.

1.3 Työn rajaukset ja rajoitukset

Tässä työssä tutkitaan hybridijärjestelmiä yleisesti lämmöntuotannossa paikallisten järjestelmien osalta, ja tapauskohtaisesti vain seuraavien järjestelmien osalta: Ilmalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmä, (Englanniksi Hybrid Heat Pump And Boiler System, HP-B), maalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmä (Hybrid Ground Source Heat Pump And Boiler System, GRHP-B) sekä aurinkopaneeli- maalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmä (Hybrid Solar Assisted Heat Pump And Boiler System SAHB-B).

Valituista järjestelmistä ensimmäisestä, (HP-B) tehdään energiasimuloinnin lisäksi myös kannattavuusanalyysi kahdella eri menetelmällä. Kahta muuta järjestelmää tarkastellaan ainoastaan energiasimuloinnin, ja teorian pohjalta.

Järjestelmät, joita tässä työssä tutkitaan, ovat rajattu käsittämään pelkästään paikallisia, eristettyjä pienen kokoluokan hybridilämmöntuotantojärjestelmiä. Käytännössä tämä tarkoittaa järjestelmiä, mitkä toimivat yksittäisissä rakennuksissa, tai korkeintaan tonttikohteisissa kohteissa. Isompia, esimerkiksi tuuli- tai vesivoimalla toimivia hybridijärjestelmiä tai CHP-laitoksia ei tässä työssä tarkemmin tapauskohtaisen tutkimuksen kannalta tutkita.

Teoriaosuudessa käsiteltävien järjestelmät on jaoteltu kahteen eri luokkaan, polttoainepohjaisiin- ja uusiutuvaa energiaa hyödyntäviin hybridijärjestelmiin (PPHJ ja UHJ). Polttoainepohjaisten järjestelmillä tarkoitetaan tässä työssä poikkeuksetta fossiilisia polttoaineita hyödyntäviä järjestelmiä, kuten esimerkiksi kaasu- tai öljykattilahybridijärjestelmiä. Bio- vety- tai muita päästöttömiä/vähäpäästöisiä polttoainehybridijärjestelmiä ei tässä työssä tutkita.

Ympäristövaikutusten analysoinnissa ei ole otettu huomioon laitteistojen tai materiaalien valmistuksessa/kuljetuksessa syntyviä päästöjä. Ympäristövaikutuksissa on myös ainoastaan huomioitu hiilidioksidipäästöt. Muiden pienhiukkasten osalta käsittelyä ei tässä työssä tehdä.

Tapauskohtainen tutkimuskohteen valinta kohdistui Porissa sijaitsevan Kalaholman koulu. Koulukompleksiin kuuluu kaksi rakennusta, joista mallinnetaan ainoastaan toinen. Myös olosuhdesimuloinnin ja energiankulutuksen osalta arviointi keskittyy vain toiseen rakennuksesta. Koulun tarkempi kuvaus on esitetty tämän työn luvussa 2.3.

Mallituksen rajausta on tehty sen perusteella, että toisesta rakennuksesta ei löytynyt mallintamiseen tarvittavia tietoja (pohjapiirustuksia tai rakennetyyppejä). Lisäksi toisen rakennuksen lämmönkulutus arvioidaan olevan hyvin pientä päärakennuksen lämmönkulutukseen suhteutettuna (ainoastaan n. 5 %, kokonaislämmönkulutuksesta)

1.4 Tapauskohtaisen tutkimuskohteen valinnan perusteet

Kalaholman koulun tapaus on mielenkiintoinen monella tapaa erityisesti tämän diplomityön kannalta. Kouluun ollaan suunnittelemassa konkreettinen hybridilämmitysjärjestelmä (hybridi-ilmavesilämpöpumppu- kattilajärjestelmä). Koulussa on tällä hetkellä käytössä fossiilista polttoainetta käyttävä (öljy) kattilalaitos, jonka rinnalle ollaan asiakkaan (Porin kaupunki) pyynnöstä rakentamassa ilma-vesilämpöpumppujärjestelmä. Lämpöpumpun tarkoituksena on vähentää kattilan käyttämän polttoaineen kulutusta merkittävästi.

Suunnitelmat järjestelmään tullaan tekemään siltäkin varalta, että suunniteltua järjestelmää ei koskaan oteta käyttöön. Syynä tähän on se, että koulurakennusta on ehdotettu purettavaksi vuoteen 2025 mennessä (Porin Kaupunki, 2019). Porin kaupungin palveluverkoston kehityksen mukaan (2019) Kalaholman koulua pidetään vanhanaikaisena ja että koulutoimintaa tulisi keskittää ”elinvoimaisiin ja muunneltaviin yksiköihin”.

Tässä työssä onkin tarkoitus selvittää, onko kannattavaa toteuttaa hybridijärjestelmä tilanteessa, missä sen käyttöikä on pahimmillaan maksimissaan 4-5 vuotta. Lisäksi olisiko mahdollista, että toimiessaan hybridilämmitysjärjestelmä pidentäisi huonokuntoisten koulujen käyttöikää, tai vastaavasti oikeuttaisiko ympäristöystävällisempi järjestelmä mahdollisen peruskorjauksen koulujen osalta, jolla säästettäisiin koulun toiminta purkamisen sijaan

Kuten luvussa 1.3 ilmaistiin, tapauskohtaisen tutkimuksen osalta tutkittaviksi hybridijärjestelmiksi on valittu ensisijaisesti kolmea järjestelmää: ilmalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmä, maalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmä sekä aurinkopaneeli- maalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmä.

Näistä ensimmäiseksi mainittua järjestelmää analysoidaan asiakkaan pyynnön toimesta, ja siitä syystä, että mahdollisesti vastaava järjestelmä on Kalaholman kouluun rakenteilla. Seuraavaa kahta analysoidaan ainoastaan teoreettisesta näkökulmasta, eikä niiden toimintaan tai ylipäätään toteutuskelpoisuuteen oteta tässä työssä tarkemmin kantaa.

Myös muita hybridijärjestelmiä pohdittiin vaihtoehtoiseksi tapauskohteeksi kohteessa, kuten tuuli- tai vesivoimaan perustuvat hybridijärjestelmät. Nämä osoittautuivat tutkimuksen alkuvaiheessa hankaliksi mallintaa. Koulurakennuksen verrattain pienen lämmönkulutuksen takia muutkaan suuremmat hybridilämmöntuotantojärjestelmät eivät vaikuttaneet potentiaalisilta vaihtoehdoilta mallituksen ja simulaation kannalta.

2 Tausta

Tässä luvussa esitetään taustoja tälle diplomityölle. Kappaleessa esitellään tutkittava koulurakennus, kaupungin, missä koulurakennus sijaitsee erityisesti hybridijärjestelmien käytön kannalta, koulurakennuksen vanhat sekä uudet lämmitysjärjestelmät sekä tavoitteet, mitä lämmitysjärjestelmän uusimisella on tarkoitus saavuttaa.

2.1 Suomen ilmastotavoitteet

Kasvihuoneilmiön voimistumisen ja ympäristön turvaamisen tarpeen seurauksena, Suomi länsimaisena demokratiana on ryhtynyt toimenpiteisiin hallitsemaan ja hillitsemään edellä mainittuja toimenpiteitä. Keinoja, millä ilmastonmuutosta pyritään pysäyttämään tai ainakin hillitsemään, ovat ensisijaisesti lainsäädännölliset sekä tekniset ratkaisut vanhojen, päästöjä aiheuttavien järjestelmien uusimiseen ja päivittämiseen.

Ilmastonmuutoksen hillitsemistä rajoittavat konkreettisen päästöjen karsimisen lisäksi hyvin tehokkaasti kansainväliset sopimukset, sekä yhteistyö. Suomi, osana Euroopan Unionia on sitoutunut Pariisin ilmastopimukseen (2016) minkä mukaan Suomen ja muiden sopimuksen ratifioineiden maiden tulisi rajoittaa ilmastonlämpeneminen 1.5 Celsius asteeseen vuoteen 2030 mennessä. Tämän lisäksi Suomi on sitoutunut siihen, että vähentäisi kaikkia päästöjään 80 % vuoden 1990 tasosta, vuoteen 2050 mennessä.

Vaikka päästöjä pitäisi voidaan rajoittaa kaikilla sektoreilla, kuten maataloudessa (erityisesti lihantuotannossa) ja teollisuuden tuotannossa, suurimmat säästökeinot ja toimenpiteet koskevat energiasektoria ja liikennettä. Syy tähän on ilmeinen, sillä yhteensä liikenteen kanssa, energiasektorin päästöjen määrä on yli 80 % koko Suomen päästöistä (Suomen Hallitus, 2016)

Konkreettisia keinoja päästöjen hillitsemiseen on useita. Yksi ilmeisimpiä on kuitenkin fossiilisten polttoaineiden vähentäminen ja poistaminen kokonaan energiantuotannossa korvaamalla ne uusiutuvalla energialla tuotetuilla järjestelmillä tai ydinvoimalla. Suomi ei ole säätänyt tilanteesta lakia tai määräystä, mutta esimerkiksi valtioneuvoston kanslia on esittänyt, että vuoteen 2040 mennessä, Suomi olisi energiasektorin osalta täysin hiilineutraali (Koljonen, ym., 2019).

Ilmastotavoitteessa on syytä kuitenkin huomioitava muutama asia. On syytä muistaa, että hiilineutraalisuus ei tarkoita sitä, että fossiiliset polttoaineet kielletäisiin kokonaan, vaan että maaperän, lähinnä metsien sitoma ja tuotettu hiilidioksidipitoisuus olisi tasapainossa tai negatiivinen.

Tämän lisäksi on huomioitava, että Pariisin ilmastopimuksessa puhutaan kaikkien päästöjen vähentämisestä, ei pelkästään hiilidioksidin. Hiilidioksidin merkitys kasvihuonekaasuna on selkeästi merkittävin ihmisen aiheuttamana, jonka seurauksena usein ilmastomuutoskeskusteluissa sen seurauksena muiden haitallisten kasvihuonekaasujen ja päästöjen käsittely jää usein hyvin vähälle.

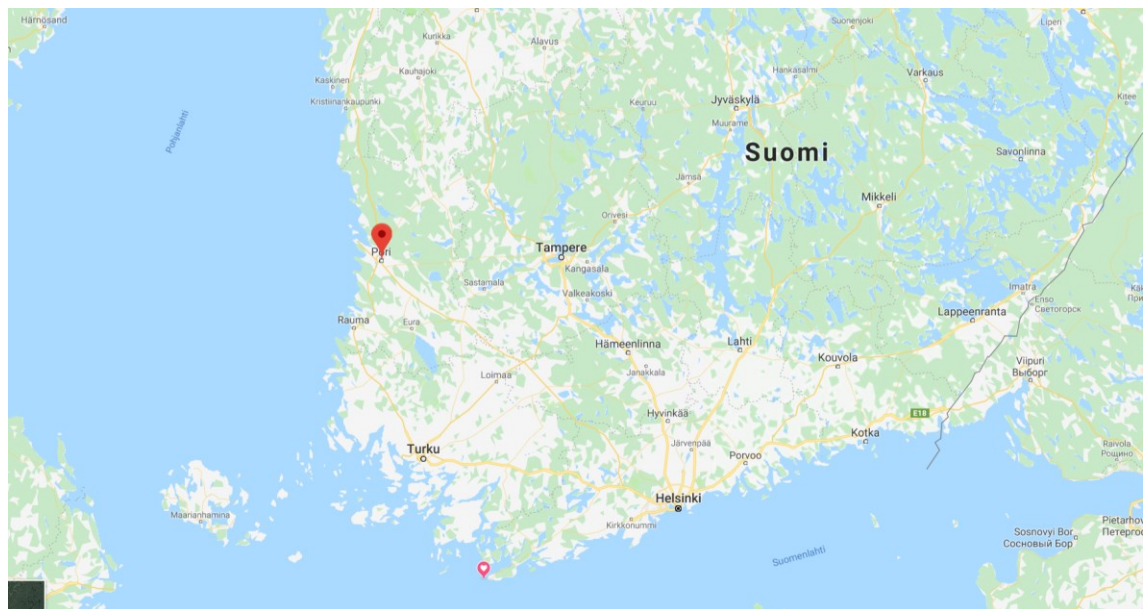
Kuten tässä työssä on aikaisemmin mainittu, vaatii päästöjen vähentäminen, yhteistyötä eri organisaatioiden, kuten valtioiden välillä. Tämän lisäksi se vaatii yhteistyötä valtion sisällä toimivien tahojen, kuten energiatuotantolaitosten ja kuntien välillä.

Kuntien toimintatapojen muuttamisen merkitys päästöjen vähentämisessä on merkittävä, koska kuntatasolla rajoitukset ja päästöjen vähentäminen voi olla käytännöllisempää toteuttaa, kuin koko Suomen mittakaavassa. Kuntien on itse huomattavasti helpompaa arvioida omia päästöjen määrää, sekä mahdollisia hiilinieluja erinaisten parametrien avulla, kuten väestön, energiantuotannon tai metsäalueiden pinta-alan avulla.

Samalla kunnat voivat laskelmoida itse, onko tavoitteisiin pääseminen realistista omien vuosibudjettien rajoissa. Tässä työssä tarkasteltava rakennus sijaitsee Porissa, jolla Suomalaisena kuntana on osansa päästöjen vähentämisessä ja hillitsemisessä.

2.2 Porin kunta

Pori on vuonna 1558 perustettu kaupunki Suomessa, joka sijaitsee Satakunnan maakunnassa Suomen länsiosassa Kokemäenjoen suulla, Selkämeren rannikolla. Porin koordinaatit kartalla ovat: 61°29'N, 021°48'E. Porin alue koostuu useista meri- sekä maa-alueista. Porin kokonaispinta-ala on n. 2000 m², joista vesialueita on n 830 m².



Kuva 1. Porin kartta (saatavilla: www.maps.google.fi, 2019)

Porissa vuonna 2017 asui yhteensä n. 84000 asukasta, ja sen väkiluvun ennustetaan olevan kasvussa. Pori on väkiluvultaan Suomen 10. suurin kaupunki. (Porin Kaupunki, 2019).

Pori on tyypillinen suomalainen kaupunki siinä mielessä, että sen ilmasto ja elinkeinomenetelmät eivät poikkea juurikaan muista suomalaisista rannikkokaupungeista. Porissa on toimiva lentokenttä, rautatieasema sekä satama. Peruspalveluina Pori tarjoaa muun muassa terveyspalveluja, kirjastoja ja kouluopetusta.

Porissa toimi vuonna 2019 yhteensä 24 peruskoulua, kolme lukiota sekä yliopisto ja muutama muu ammatti- ja ammattikorkeakoulu. Kaiken kaikkiaan koulurakennuksia on yhteensä n. 30. Yliopistotoiminta alkoi porissa vuonna 1983, ja peruskouluopetus kansakoulun muodossa vuonna 1898. (Porin Kaupunki, 2019)

2.2.1 Porin energiantuotanto ja kulutus

Porin kaupungin energiankulutus vuonna 2017 oli noin 1063 GWh. Pori on energiakulutuksen osalta sijalla 23, kun verrataan eri suomen kuntia. Suurin osa energiantuotannosta menee teollisuuteen (40 %). Asumiseen ja maatalouteen kuluu noin 36 % ja rakentamiseen 22 %. (energiateollisuus, 2018)

Porin kaupungissa toimii kaksi CHP-laitosta. Toinen laitoksissa, Aittaluodon voimalaitos sijaitsee Porin keskustassa ja toinen: Kanaan voimalaitos, sijaitsee Kaanaan teollisuuspuistossa, 10 km Porin keskustasta luoteeseen. Molemmat laitoksista tuottavat n. 600 GWh, yhteensä 1200 GWh energiaa vuodessa. Tästä energiasta noin puolet on kaukolämpöä. (Porin energia, 2019)

Aittaluodon voimalaitoksessa on kaksi leijukerroskattilaa, mitkä polttavat pääosin biopolttoaineita. Laitos tuottaa lämmön, ja sähkön lisäksi myös prosessihöyryä, mitä esimerkiksi Aittaluodon ja kupariteollisuuspuiston teollisuustuotanto hyödyntävät. Kaanaan voimalaitoksessa polttoaineena toimii joko puu, turve tai hiili. Aittaluodon voimalaitoksen lämpöteho on n. 200 MW ja Kaanaan. noin 1000 MW.

Porissa on CHP-laitosten lisäksi, toiminnassa muutama tuuli- ja vesivoimalaitos. Laitokset ovat eri yritysten, kuten Fortumin ja Porin energian omistamia. Laitokset tuottavat sähköä Porin kaupungin ja Porin seudun sähköverkkoon. (Energiavirasto, 2019)

Porissa ei ole käytössä yhtään sähköverkkoon sähköä tuottavaa keskitettyä aurinkovoimaa. Porissa aurinkoenergian hyödyntäminen rajoittuu rakennuskohtaisiin järjestelmiin. Esimerkiksi Porissa toimii Suomen ensimmäinen aurinkoenergiaa hyödyntävä uimahalli (Porin Kaupungin Ympäristövirasto)

Porissa on kuitenkin muiden isompien kaupunkien ja kuntien tapaan mahdollista ryhtyä aurinkoenergian tuottajaksi. Porin energia tarjoaa valmiita aurinkopaneelipaketteja kuluttajille. Aurinkopaneeleista saatava energia hyödynnetään pääosin kohteessa. Mikäli aurinkopaneeli tuottaa enemmän sähköä, kuin rakennus käyttää, voidaan se syöttää takaisin sähköverkkoon muiden käytettäväksi. Porin energia maksaa sähköstä ennalta sovitun hinnan, joka vähennetään käyttäjän sähkölaskusta. (Porin energia, 2019)

2.2.2 Porin kaupungin ilmastotavoitteet

Koko muun Suomen tavoin, myös Porin kaupunki on sitoutunut osaltaan ehkäisemään ilmastonmuutosta ja vähentämään tuottamiaan päästöjä. Merkittävin askel tässä asiassa otettiin vuonna 2016, kun Pori liittyi Suomen Ympäristökeskuksen lanseeraamaan Hinku (hiilineutraali kunta) -hankkeeseen. Hinkun tavoitteena on, että sen jäsenet olisivat hiilineutraaleja kuntia vuoteen 2030 mennessä. (Porin Kaupunki, 2016). Porin kaupunki on siis täten sitoutunut vähentämään päästöjä vuoteen 2030 mennessä mikä on enemmän ja aikaisemmin, mitä Pariisin ilmastopöytäkirja vaatii.

Käytännössä hiilineutraaliuden tavoittelemisen suurimmat ratkaisuehdotukset keskittyvät energiasektorin ja liikenteen päästöjen rajoittamiseen. Päästöjä pyritään vähentämään ensisijaisesti energiatehokkuuden parantamisella, sekä lisäämällä uusiutuvien energiantuotantomuotojen kapasiteettia (Porin Kaupunki, 2016).

Poriin ollaan esimerkiksi rakentamassa Lammiin alueelle verrattain suurta tuulipuistoa, mikä sisältää 14 turbiinia. lisäksi Porin alueella on ainakin 15 maankäyttölupaa hankittu tuulivoimaloille. Uusia turbiineja, mikäli kaikki lupahakemukset menevät läpi, on yhteensä 78 kappaletta ja niiden yhteisteho on maksimissaan 273 MW (Suomen Tuulivoimayhdistys, 2019) & (Satakunnan kansa, 2018)

Tuotantopuolen lisäksi ilmastotavoitteisiin pääseminen edellyttää, että myös loppukäyttäjä puolella tapahtuu selkeitä rakenteellisia muutoksia. Yksittäisten asuntojen tapauksessa Pori ei kuntana voi juurikaan vaikuttaa muuten kuin tarjoamalla uusiutuvaa energiaa kilpailukykyiseen hintaan. Sen sijaan julkisissa rakennuksissa voi Pori kuntana tehdä konkreettisia muutoksia.

Kaikkien Porin kaupungin ylläpitämien palvelurakennusten, kuten sairaaloiden tai koulujen lämmitysmuotoja on hyvin hankala selvittää. On kuitenkin turvallista olettaa, että myös muissa, kuin Kalaholman koulussa on käytössä fossiilisia polttoaineita käyttäviä lämmitysjärjestelmiä. Näin ollen Kalaholman koulun tapauksen tarkastelu voi toimia pohjana myös muiden koulujen tai vastaavien rakennusten analysoinnissa mahdollisten päästövähennysten osalta.

2.3 Kalaholman ala-aste

Kalaholman koulu sijaitsee Porissa Lukkarisannan kaupunginosassa noin 2 km päässä Porin keskustasta itään. Koulualueen rajaa koillisessa oleva Lukkarisannantie, kaakkoispuolella kulkeva junarata, lounaissuunnassa sijaitseva joki Varvourinjuopa sekä luoteispuolella sijaitseva Sinkkitien asuinalue. Koulun koordinaatit ovat 61°29N, 21°50E.



Kuva 2. Kalaholman Koulu (Peda, 2019)

Koulurakennus ja sen piha-alue ovat rakennettu vuonna 1937. Koulukompleksiin kuuluu päärakennus sekä erillinen koulurakennus, päärakennuksesta koilliseen. Rakennukset

ovat nimetty isokouluksi sekä pikkukouluksi koon perusteella. Päärakennukseen on tehty laajennus vuonna 2002 – 2003, missä sen yhteyteen rakennettiin uusi siipi, jossa toimii kolme uutta luokkahuonetta. Koulun alueella on rakennusten lisäksi koulupiha, pallokenttä sekä jääkiekkokaukalo.

Koulussa on yhteensä 170 oppilasta, jotka jakautuvat yhdeksälle luokalle. Luokka-asteet ovat 1-5. Opetustoiminnan lisäksi koulussa toimii Porissa toimiva iltapäivätoimintaa ohjaava ”Iltis”. Osittain Iltiksestä johtuen, koulun käyttöajat ovat arkisin klo 07.30 – 17:00. Kesäisin ja lomakausina koulu ei ole käytössä. (Peda, 2019)

Kalaholman isokoulun pohjapiirustus on liitteenä tämän työn lopussa (liitteet A1 A2). Liitteissä on esitetty koulurakennusten tilat pääpiirteittäin. Liitteiden A1 sekä A2 vasemmanpuoleinen siipi on vuonna 2002 valmistunut laajennusosa.

Koulurakennuksena Kalaholman koulu on hyvin tyypillinen Suomalainen ala-aste. Rakennuksesta löytyvät toisesta kerroksesta luokatilat, ruokala ja keittiö, juhlasali, opettajanhuone, rehtorin huone, kanslia, sekä kouluntoiminnan kannalta oleelliset tilat, kuten siivoushuoneet, vessat ja konehuoneet.

Alakerrasta löytyy vessatilat, mistä pääsy on mielenkiintoisesti pihatasolta, lämmönjakohuone, ryhmätila, puu- ja käsityöluokat, tyttöjen sekä poikien pukuhuoneet, vahtimestarin tilat sekä laaja ryömintätila laajennusosan alapuolella.

Kalaholman pikkukoulu sijaitsee isokoulun itäpuolella. Pikkukoulu koostuu kolmesta luokkatilasta, wc-tilasta ja ullakkotilasta. Pikkukoulun ullakkotila on kylmä, ja sitä käytetään lähinnä varastona.

2.3.1 Kalaholman koulun lämmitysjärjestelmät

Iso- ja pikkukoulun tila- ja käyttöveden lämmitys toteutetaan öljykattilajärjestelmällä, mikä sijaitsee päärakennuksen lämmönjakohuoneessa. Nykyinen järjestelmän kaavio on esitetty liitteessä B1. Liitteestä B1 voidaan nähdä, että järjestelmä koostuu öljysäiliöstä, kattilasta, polttimesta neljästä eri lämmityspiiristä.

Koko järjestelmän syöttämä lämmin vesi kiertää sekä edellä mainitussa neljässä eri lämmityspiirissä, että käyttövesipiirissä. Lämmityspiireistä kaksi ovat isokoulun, ja pikkukoulun tilalämmityksiin ja kaksi ovat isokoulussa sijaitsevien ilmanvaihtokoneiden lämmityspiirejä. Putket isokoulussa kulkevat kellarikerroksen katossa, josta ne haarautuvat yläkerrokseen. Lämpöputket ovat eristetty lämpöeristein kaikkialla, paitsi putkien liitoskohdissa ja venttiilien kohdilta.

Lämmönjako tiloissa tapahtuu vesipattereilla. Vesipatterit sijaitsevat yleisesti ulkoseinillä ikkunoiden alapuolella. IV-koneiden tuloilman lämmitys tapahtuu lämmityspatterilla. Koneissa ei ole jälkilämmityspattereita, joten kanavalämmitystä ei ole.

Koulun käyttövesijärjestelmä sisältää kylmän, lämpimän ja kiertovesiputkistot sekä kiertovesipumpun. Käyttövesijärjestelmä palvelee niin isokoulua, kuin pikkukouluakin. Käyttövettä käytetään tyypillisissä vesikalusteissa, kuten hanoissa ja suihkuissa.

Pikkukoululle käyttövesiputkisto kuljetetaan maan alla betonoidussa vallihaudassa. Samassa kaukalossa kulkee myös pikkukoulun tilalämmityspotket. Käyttövesi molemmissa rakennuksissa lämmitetään lämmityskattilassa olevalla käyttövesikierukalla.

Koululla on neljä liittymää Porin kaupungin putkiverkostoon; Kaksi kylmän veden liittymää (isokoululle ja pikkukoululle), mitkä sijaitsevat koulurakennusten itäpuolella, sekä isokoulun, ja pikkukoulun jätevesiviemäri liittymät, mitkä sijaitsevat koulujen etelä puolella. Sadevedet tontilla ohjataan pinnantasauksin tonttia osittain ympäröivään ojaan, ja osittain koulualueella olevaan pumppukaivoon. Kattovedet ohjataan kattokaivojen avulla koulun pohjoispuolella olevaan pumppukaivoon, josta ne pumpataan ojiin.

Isokoulussa on käytössä kaksi ilmanvaihtokonetta. Toinen koneista on pelkästään keittiön tulo/poistoilmakone, ja toinen koneista palvelee muita tiloja. Muita tiloja palveleva kone sijaitsee IV-konehuoneessa, mikä sijaitsee opettajanhuoneen vieressä olevan portaikon yläpäässä. Keittiötä palveleva kone sijaitsee keittiössä erillisessä kuilussa. Keittiön ilmanvaihtokone on varustettu pyörivällä levylämmönsiirtimellä, ja muita tiloja palveleva kone ristivirta-lämmöntalteenotolla.

Pikkukoulussa on käytössä kolme pientä ilmanvaihtokonetta. Näiden koneiden tuloilma lämmitetään sähköllä. Pikkukoulun koneiden ominaisuuksia ei ole otettu huomioon mallinnuksessa.

2.3.2 Kalaholman koulun energiankulutus

Kalaholman koulun öljynkulutusta on mitattu/mitataan laskemalla suoraan tilatun öljyn määrää ja valvomalla öljysäiliön öljyn määrää. Öljysäiliö on tilavuudeltaan 5 m³. Öljyä tilataan aina lisää, kun säiliön lukema näyttää alle 3000 l. Öljynkulutus vuonna 2018 oli yhteensä 44 000 l, mikä vastaa 90 % (10 l/kWh) hyötysuhteella 396 000 MWh kulutusta. Öljyn kulutus vaihtelee vuosittain \pm 1000 l.

44000 l öljyn poltosta vapautuva hiilidioksidin määrä ilmakehään on n. 93 tonnia. Laskussa on käytetty öljyn tiheytenä 0,8 kg/dm³, ja muutokertoimenä 73,1 t/TJ (Tilastokeskus, 2019).

Öljykattilan teho on 160 kW. Teho on osoittautunut riittäväksi koska järjestelmä on ollut käytössä jo vuodesta 1997, ja muutoksia ei olla ennen vuotta 2019 ehdotettu. Kyseisellä muutoksella ei muutenkaan tavoitella tehon kasvatusta, ainoastaan polttoainekustannusten pienentämistä.

Koulun energiankulutus jakautuu suhteessa 20/80 % siten, että 20 % lämpöenergiasta menee käyttöveden lämmitykseen, ja loput 80 % menee ilmanvaihtokoneiden tuloilman sekä tilojen lämmitykseen. Tämä tarkoittaa, että vuonna 2018 lämpimän veden lämmittämiseen käytetty energia oli 79200 kWh ja tilalämmitykseen 316 800 kWh.

Sähkönkulutus ala-asteella vuonna 2018 oli 58 000 kWh. Sähkön tuotantomuodosta ei ole tietoa, mutta tässä työssä oletetaan, että käytösähkö on tuotettu puhtaasti uusiutuvilla sähköntuotantomuodoilla.

2.3.3 Kalaholman koulun energiantuotanto tulevaisuudessa.

Kalaholman koulun lämmityskustannuksia tulisi tulevaisuudessa oletettavasti pienentää, mikäli tähän on realistiset resurssit rahallisesti. Tämä käytännössä tarkoittaa joko koulun remontoimista kokonaan, (ilman pitävyys rakennuksessa, ikkunatyypit, rakennetyypit) tai lämmitysjärjestelmän uusimista.

Kuten aikaisemmin todettiin, ratkaisuksi on ehdotettu uutta lämmitysjärjestelmää. Koulun ollaan mahdollisesti rakentamassa uutta ilmavesilämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmää. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että olemassa olevan kattilalaitoksen rinnalle rakennetaan ilmavesilämpöpumppu.

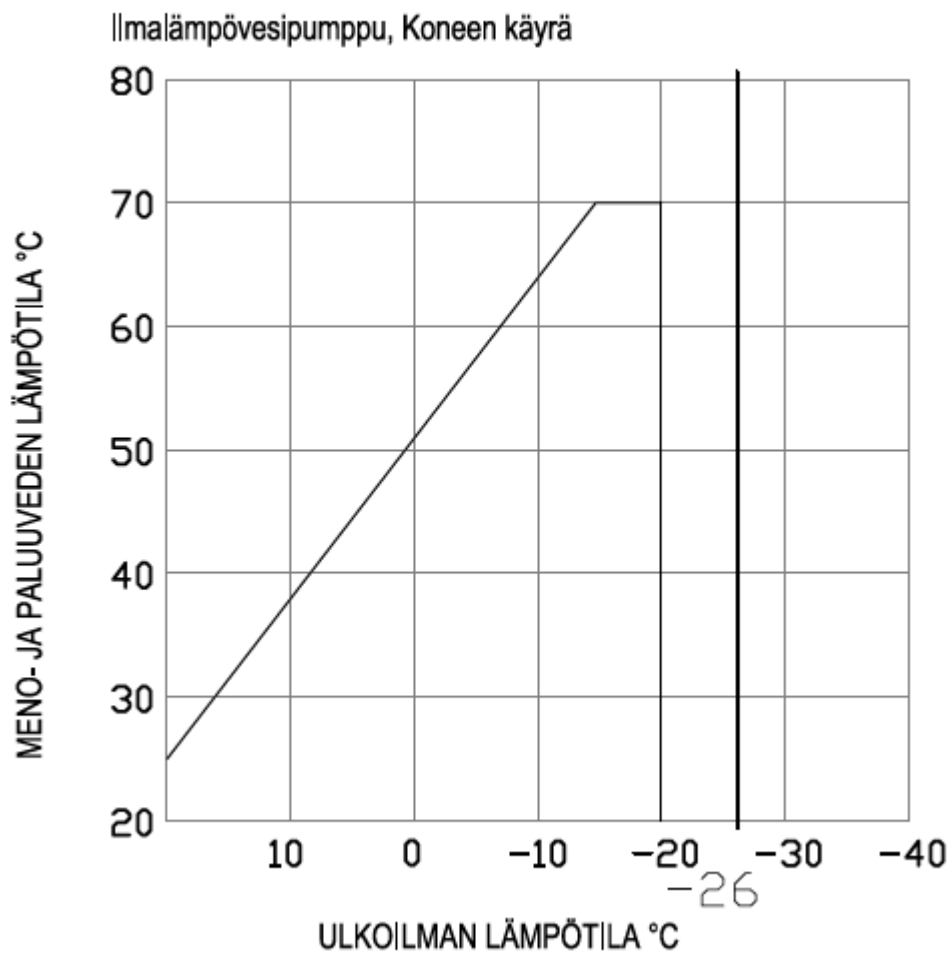
Lämpöpumpun on tarkoitus tuottaa suoraan lämmitettyä vettä lämmityspiiriin, vähentäen näin öljykattilan käyttöastetta. Koulun käyttäjien tavoitetaso lämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmälle olisi, että koulun vuosittainen öljynkulutus puolittuisi verrattuna pelkkään öljykattilajärjestelmään.

Järjestelmä suunnitellaan niin, että ilmalämpöpumppu toimisi rakennuksen primääri-lämpöenergian lähteenä ja öljykattila sekundäärilämpöenergian lähteenä. Öljykattila toimisi pelkästään huippukulutuksen aikana, huoltotilanteissa, tai tilanteessa, missä lämpöpumpussa ilmenee toimintahäiriö.

Ilmalämpöpumpun ulkoyksikkö sijoitetaan rakennuksen pohjoispuolelle niin sanottuun syvennykseen, minkä rajaavat koulun liikuntasali sekä uusi laajennusosa. Ulkoyksikön ympärille rakennetaan puusta ulkotila, mikä lukitaan ilkivallan ehkäisemiseksi. Ulkoyksiköltä vesi tuodaan kellarin katossa vesiputkilla lämmönjakohuoneelle.

Lämmönjakohuoneeseen lämpöpumpun yhteyteen rakennetaan lämminvesivaraaja, mikä tulee toimimaan puskurisäiliönä järjestelmälle. Säiliön yhteyteen rakennetaan pumppu, mikä pumppaa lämmitysjärjestelmistä tulevaa paluuvettä lämpöpumpulle. Lämpöpumppu tuottaa suoraan lämmintä vettä puskurisäiliöön, josta se pumpataan lämmityspiiriin. Lämmityspiirissä on öljykattilalta, sekä lämpöpumpulta tulevan menoveden yhdistävä kolmitieventtiili.

Mikäli lämpöpumpun tuottaman menoveden lämpötila ei ole tarpeeksi korkealla (70 °C kovilla pakkasilla), saa kolmitieventtiili ohjauskäskyn, minkä jälkeen se päästää asteittain läpi öljykattilan tuottamaa menovettä. Venttiili on täysin auki tilanteissa, missä lämpöpumpun menovettä mittaavan anturin antama käyrä (kuva alla) on alempi kuin asetettu arvo (arvo, missä lämpöpumpun COP arvo putoaa alle yhden),



Kuva 3. Ilmavesilämpöpumpun operatiivinen toimintakäyrästä

Kuten kuvasta nähdään, pumppu ei ole toiminnassa, mikäli ulkoilman lämpötila on yli 20 °C, eli tilanteessa missä lämmitystä ei tarvita. Pumppu ei myöskään käy, mikäli ulkoilman lämpötila on alle -20 °C. Mikäli ulkoilman lämpötila on välillä -15 °C - 20 °C, menoveden lämpötila on huipuissa, eli pumppu ei enää lämmitä vettä enempää. Koko järjestelmä on kuvattu kaaviona liitteessä B2

3 Paikalliset energiatuotantojärjestelmät

Seuraavassa kuvataan paikallisen energiatuotantojärjestelmien peruseräiteitä, niiden hyötyjä ja haittoja sekä vaikutuksia ympäristön näkökannalta. Lisäksi kuvataan myös hybridijärjestelmän periaate, sekä yleisimpiin hybridijärjestelmiin kuuluvien energian ja lämmöntuotanto tuotantojärjestelmät, kuten lämpöpumpun, aurinkopaneelin ja kattilan toiminta.

3.1 Paikallisten energiatuotantojärjestelmien käyttö energiantuotannossa

Suurin osa lämmön ja sähkön tuotannosta Pohjois-Euroopassa ja erityisesti Suomessa, ovat olleet 1950-luvulta asti hyvin pitkälti suurten, polttoaineenaan öljyä, hiiltä tai puuta käyttävien voimalaitosten sekä kaukolämpötuotannon varassa (Majuri, 2016). Suurilla voimalaitoksilla on merkittävä merkitys päästöjen tuotossa.

Keskitetty voimalaitokset ovat tyypillisesti hyvin pitkäikäisiä ja niiden investointikustannukset ovat suuret. Ne ovat kuitenkin lähtökohtaisesti hyvin tuottoisia sijoittajille, koska energiantarve on aina olemassa, niin kauan kun alueella asuu ihmisiä, tai alueella on muuta toimintaa, kuten teollisuutta.

Keksitetyn energiatuotannon haittoja ovat kuitenkin ne, että iso osa olemassa olevista voimalaitoksista käyttävät edelleen fossiilisia polttoaineita energiantuotannossa (Tilastokeskus, 2018). Fossiilisten polttoaineiden käyttö energiantuotannossa on oikeutettua esimerkiksi taloudellisesta- ja käytettävyyden kannalta, mutta harvemmin ympäristön kannalta. Tämän lisäksi keskitetyn energiatuotannon suurimpia haasteita ovat jakeluverkon käyttöhäiriöt, sekä verkon sopeutuminen nopeille muutoksille, kuten äkillisille huippukulutuksille.

Vaikka Suomessa on pyritty yhä enemmän siirtämään tuotantoa hiilineutraaliksi lisäämällä uusiutuvien energiamuotojen sekä ydinvoiman tuotantoa, on keskitettyjen voimalaitosten uusiminen ja korvaaminen osoittautunut verrattain hitaaksi prosessiksi. Tosin viime vuosina erityisesti tuulivoiman rakentaminen on kiihtynyt. (Suomen Tuulivoimayhdistys, 2019)

Korvaavien voimalaitosten tapauksessa valitettavasti isossa mittakaavassa rakennettavat uusiutuvaa energiaa hyödyntävät energiatuotantolaitokset (kuten esimerkiksi vesi ja tuulivoimalat) eivät sellaisenaan skaalaudu aina erityisesti syrjäseuduilla oleviin pienen kuormituksen omaaviin kohteisiin. Lisäksi vaikka energiatuotantomuoto muutetaan puhtaammaksi, on siirtohäviöt ja verkon rasitus edelleen haastava ongelma.

Osittain edellä mainituista syistä on ruvettu tutkimaan mahdollisuutta lisätä paikallisten energiatuotantomuotojen osuutta kokonaisenergiantuotannossa. Erityisesti asumis- ja liikerakennuksissa, mitkä ovat kokoluokaltaan ja energiantarpeiltaan sopivia paikallisille energiatuotantomuodoille, kuten lämpöpumpuille tai aurinkopaneeleille.

Paikallisilla energiatuotantojärjestelmillä tarkoitetaan järjestelmiä, missä energia (yleensä lämpö/jäähdytys ja sähkö) tuotetaan suoraan käyttökohteessa, tai käyttökohteen välittömässä läheisyydessä. Jos huomioon ei oteta esimerkiksi teollisuuden prosesseissa muodostuvaa energiaa, paikalliset energialähteet vaativat ulkoisen energianlähteen toimintaan. Ulkoinen energianlähde voi olla polttoainepohjainen tai uusiutuvaa energiaa käyttävä järjestelmä. (Laitinen, ym., 2014)

Paikallisia pienen mittakaavan energiatuotantojärjestelmistä yleisempiä ovat jo pitkään olleet eri tyyppiset lämpöpumput, aurinkopaneelit sekä kattilalaitokset, mitkä käyttävät polttoaineenaan joko uusiutuvia tai fossiilisia polttoaineita. Näistä erityisesti lämpöpumppujärjestelmät ovat vuodesta 2000 eteenpäin yleistyneet merkittävästi (Laitinen, ym., 2014).

Suomessa esimerkiksi maalämpöpumppujärjestelmät ovat yhä suositumpia erityisesti omakotitaloissa, missä se on lämmitysmuotona vähitellen korvannut tyypilliset sähkö- tai öljylämmitysmuodot, joskin maalämpöpumppujen suosio on huomattavasti pienempää, kuin ilmalämpöpumppujärjestelmien (Laitinen, ym., 2014). Lämpöpumput ovat yksi tämän työn kannalta keskeisimmistä paikallisten energiatuotantomuotojen järjestelmistä.

Paikallisen energiatuotantojärjestelmän mitoituksessa on oltava tarkempi, kuin keskitetyssä energiatuotantojärjestelmissä. Yksittäisen rakennuksen energiankulutuksen virhearviointi ei aiheuta keskitetylle voimalaitokselle suuria säätötarpeita/häviöitä, kun taas paikalliselle pienen mittakaavan energijärjestelmälle virhearviointi voi pahimmassa tapauksessa johtaa järjestelmän alimitoitukseen (ja samalla mahdollittomiin olosuhteisiin käyttökohteessa) tai pahimmillaan laitteiston rikkoutumiseen.

Rakennuksen lämmön- ja jäähdytystarpeen mittaaminen ei ole kuitenkaan yksiselitteinen asia. Tämä aiheuttaa energiantarvetta mitatessa suuriakin eroja eri alueiden välillä. Osassa maailmaa ei esimerkiksi lämmitykselle ole lainkaan tarvetta, kun taas toisessa se on ehdoton välttämättömyys, vaikka vertailtava rakennus olisi muuten täysin identtinen.

Lämmöntarpeen arviointi ja laskeminen sen sijaan on yleisesti helposti vertailtavissa samalla alueilla olevien rakennusten välillä. Erityisesti, jos rakennusten sijaintien ilmasto ja populaatio ovat samankaltaiset. Koska lämmön johtuminen rakennuksessa on suoraan verrannollinen ulko- ja sisälämpötilan erotukseen, ja ihmisten käyttöveden kulutus on tyypillisesti keskimäärin sama, on erilaisten rakennusten vertailu samalla alueella mahdollista.

Suomessa rakennuksen lämpöenergiankulutus koostuu tyypillisesti pääosin tilalämmityksestä, tuloilman lämmityksestä, sekä käyttöveden lämmityksestä. Lähtökohtaisesti tila- ja tuloilman lämmittämiseen kuluvan lämpöenergian tarve on jatkuvaa, mutta kausittaista, ja käyttöveden lämmitys jatkuvaa, aina jos rakennuksessa on asukkaita/toimintaa.

Rakennuksen sähkönkulutuksen arviointi on vähintään yhtä hankalaa kuin lämmöntarpeen arviointi. Esimerkiksi isommassa mittakaavassa hyvin samantyyllisillä valtioilla ilmaston ja populaation kannalta voi olla hyvinkin erilainen keskimääräinen sähkönkulutus. Sähkönkulutus ei myöskään ole välttämättä verrannollinen minkään muunkaan maiden välillä verrattavissa olevien muuttujien kanssa, kuten bruttokansantuotteen tai elinkeinomenetelmien suhteen. (Wogan;Oradhan;& Albardi, 2017)

Esimerkiksi Omanin sähkönkulutus on vain puolet Kuwaitin sähkönkulutuksesta, vaikka Oman on suurempi, vauraampi (BKT-mitattuna) ja populaatioltaan kaksinkertainen Kuwaitiin verrattuna. Molempien maiden ilmasto ja vuoden keskilämpötilat ovat kuitenkin hyvin samankaltaiset. (Wogan;Oradhan;& Albardi, 2017)

Sähkönkulutuksen vaihtelevuudet ilmenevät myös yksittäisissä rakennuksissa. Riippuen rakennuksen käyttötarkoituksesta, tai asuinrakennuksen asukkaiden käyttötavoista, voi samankokoisilla ja samalla paikkakunnalla sijaitsevien rakennusten sähkönkulutus vaihdella merkittävästi.

Suomessa sähkönkulutusta uusissa rakennuksissa arvioidaan ennalta määriteltujen periaatteiden perusteella. Rakennuksen valaistus, käyttölaitteisto, ilmanvaihto ja lämmitykseen kuluvalle sähkölle on määriteltä kertoimet rakennusmääräyskokoelmissa (D3). Näillä kertoimilla voidaan arvioida rakennuksen sähkönkulutusta vuoden aikana.

Todellisuudessa sähkönkulutus eri rakennuksissa selviää ainoastaan mittaamalla. Riittäväällä mittaamisella ei voida kuitenkaan ennustaa ostosähkön osuutta energiakustannuksista kuin vuodeksi tai pariksi eteenpäin, koska sähkön hintakehitys on vaihtelevaa. Sähköenergia on myös tyypillisesti Suomessa aina ulkopuolinen hankinta, mistä aiheutuu epävarmuutta energiakustannusten arviointiin.

Sähkönkulutuksen epätasaisuuden ja huippuisuuden takia on ensisijaisen tärkeää, että paikallisessa sähköntuotantojärjestelmässä on huomioitu mahdollinen huipputehontarve, sekä ylituotanto. Käytännössä tämä voidaan kompensoida jonkinasteisella varastointimenetelmällä tai vastaavasti kahden eri tuotantomenetelmän vaihtelulla. Koska lämmön ja sähkön tarve rakennuksissa saattaa vaihdella hyvinkin lyhyen aikavälin aikana, on ensisijaisen tärkeää, että paikallinen energiatuotantojärjestelmä olisi hyvin säädettävissä. Juuri tähän hybridijärjestelmät tarjoavat apua.

3.2 Hybriditekniikka

Hybriditekniikalla energian- ja lämmön tuotannossa tarkoitetaan kahden tai useamman energian/lämmönlähteen hyödyntämistä ja optimointia toimia joko samanaikaisesti, tai siten, että toisen tai molempien energioiden lähteet varastoidaan ja käytetään toisena ajankohtana, ja mahdollisesti myös toisessa paikassa. Järjestelmien toiminta-aika ja perustuu siihen, missä milläkin ajan hetkellä on energiaa saatavilla. (Mancarella, 2014)

Koska hybriditekniikka on energiantuotannossa yleisimmin vain energian siirtämistä, varastoimista ja sen hyödyntämistä myöhemmin tai muualla, voidaan tästä syystä oikeastaan sanoa, että kaikki energiatuotantojärjestelmät ovat omalta osaltaan hybridijärjestelmiä, koska järjestelmien kaikissa vaiheissa aina tuotannosta hyödyntämiseen, niiden energiataseet vaikuttavat ja vaihtelevat kaikilla tasoilla (Mancarella, 2014).

Hybriditekniikkaa voidaan hyödyntää niin, isoissa (voimalaitokset, verkko, kaupungit & yhdyskunnat), kuin pienemmässäkin (rakennukset, autot & muut kulkuneuvot, laitteet) järjestelmissä. Hybridijärjestelmät eivät välttämättä ole kovinkaan monimutkaisia systeemejä. Esimerkiksi yksinkertaisimmillaan hybridijärjestelmä voi käsittää vain energianlähteen ja siihen sisältyvän akun, jonka rinnalle lisätään yksi superkapasitaattori, jolloin järjestelmä käyttää kahta menetelmää hyödykseen. (Wang;Xu;Ma;& Zhou, 2018).

Hybridijärjestelmien koko ja toimintaperiaate vaihtelee lähes poikkeuksetta käyttökohteen toimintaperiaatteen ja erityisesti kuormituksen mukaan. Yhtä hybridijärjestelmää ei voi yleisesti sellaisenaan siirtää toiseen käyttökohteeseen, joskin toimintaperiaatteet voivat toimia käyttökohteesta riippumatta. (Wang & Chen, 2016)

Keskeinen piirre hybriditekniikoissa on uusiutuvan energian hyödyntäminen energianlähteenä, joko primäärisesti esimerkiksi lämpöpumput + aurinkopaneelit yhteiskäyttö) tai sekundäärisesti (esimerkiksi CHP-laitos pää lämmön- ja sähkönlähteenä ja aurinkopaneelit tukevana järjestelmänä).

3.3 Hybriditekniikkajärjestelmän kuvaus

Tyypillinen hybriditekniikkajärjestelmä sisältää kaksi tai useamman lämmön/sähköntuotantosysteemin komponentteineen, lämmönvaihtimen, energian varastointi- ja/tai kuljetusjärjestelmän, automaatiojärjestelmän ja käyttöliittymän, mitkä ohjaavat lämmön, sähkön ja energiatuotannon jakamista ja hyödyntämistä.

Hybridijärjestelmällä on tyypillisesti yksi energianlähde, minkä saatavuus on jatkuvaa olosuhteista riippumatta ja jolla taataan tasainen lämmön- ja sähköntuotanto, sekä yksi järjestelmä, mitä käytetään pääosin tilanteissa, missä sen käyttäminen on kannattavaa, tai kun toisen järjestelmän tuottama lämpöenergia ei ole riittävä.

Riippuen järjestelmätyypistä ja rakennuksen käyttökohteesta, hybridijärjestelmien suunnittelu vaihtelee tapauskohtaisesti. Järjestelmät ovat joko kokonaisuuksia, mitkä ovat rakennettu heti aluksi toimimaan yhdessä (CHP-laitokset) tai kokonaisuuksia, missä toinen järjestelmä on lisätty jälkikäteen edellisen järjestelmän kanssa samaan piiriin (tämän työn tapaustutkimus).

Edellä mainitun esimerkin lisäksi, hybriditekniikkaa rakennuksissa voidaan hyödyntää myös usealla eri periaatteella. Rakennukset voivat olla joko osittain, tai täysin omavaraisia lämmön ja sähköntuotannon osalta. Täysin omavaraisella rakennuksella tarkoitetaan tässä työssä sitä, että rakennus tuottaa kaiken sähkön- ja lämmöntarpeen uusiutuvilla energiamuodoilla.

Osittain omavaraisella rakennuksella tarkoitetaan sitä, että rakennus tuottaa joko kaiken tai osittain kaiken energiansa itse, mutta on riippuvainen polttoaineesta, kuten öljystä tai kaasusta/biopolttoaineesta, tai että rakennus tuottaa osan lämmön ja sähköntarpeestaan itse, mutta sen on ostettava uusiutuvaa energiaa ulkopuoliselta taholta lämmön- ja sähköntarpeen kattamiseksi.

Esimerkiksi rakennuksessa, missä on järjestelmä, missä primäärienergiälähteellä tuotetaan jatkuvasti tarvittavaa lämpöä (ilmalämpöpumppu) jota sekundäärinen järjestelmä, (voimalaitoksessa tuotettu kaukolämpö) tukee, on osittain omavarainen. Myös rakennuksessa, missä lämpöenergia tuotetaan pelkästään paikallisilla uusiutuvilla lämmönlähteillä, (maalämpöpumpulla) ja sähkö ostetaan ulkoiselta voimalaitokselta, on osittain omavarainen.

Osittain omavaraisissa järjestelmissä on hyvin tyypillistä, että toinen hybridijärjestelmän osasta perustuu energiatuotantomuotoon, missä energia energiantuotanto voidaan taata kaikissa tilanteissa, pois lukien järjestelmän vika- tai huoltotilanteissa. Käytännössä tämä tarkoittaa Suomen olosuhteissa, ja riippuen rakennuksen koosta ja käyttötarkoituksesta, joko biopolttoainetta, tai lämpöpumppuja hyödyntävää hybridijärjestelmää.

Täysin omavaraisten rakennusten tekeminen Suomessa on haastavaa, mutta ei täysin mahdotonta. Pelkästään tuuli- tai aurinkoenergiaan perustuvat hybridijärjestelmät soveltuvat huomattavasti nykytekniikalla täysin omavaraisiksi hybridijärjestelmiksi Suomen olosuhteissa, koska ne ovat hyvin riippuvaisia ympäröivistä olosuhteista. Tosin mikäli rakennuksen energiankulutus on hyvin pientä, tai tuotantolaitokset ovat tarpeeksi isoja, voidaan vastaaviakin järjestelmiä hyödyntää.

Täysin omavaraisten järjestelmien hyödyt aiheuttavat myös mahdollisia ongelmia tasaisen lämmön takaamisen kannalta. Täydellisen omavaraisuuden mahdollistaminen vaatii aina tapauskohtaista tarkastelua, riippuu myös tarvittavan energian laadusta. Hybridienergia, mikä tuotetaan rakennuksen jäähdytystä (oleskelumukavuutta) varten, voi ääritilanteissa olla poissa käytössä, tosin kuin kylmissä olosuhteissa oleva lämmitysjärjestelmä, minkä tulee aina olla päällä.

3.4 Polttoainepohjaiset hybridijärjestelmät

Vaikka fossiilisten polttoaineiden haittaavat vaikutukset ympäristöön ja ilmastoon ovat olleet tiedossa jo pitkään, yhä edelleen fossiilisten polttoaineiden osuus koko maailman energiantuotannosta on yli 75 % (PB, 2017). Suomenkin osalta vuonna 2017 fossiilisten polttoaineiden osuus kokonaistuotannosta oli n. 35 % (Tilastokeskus, 2018).

Polttoainepohjaisten järjestelmien edut energiatuotannossa ja erityisesti lämmitysenergiassa ovat sen riippumattomuus olosuhteissa, verrattain halvat ja pitkäikäiset järjestelmät ja laitteet sekä polttoaineiden suhteellisen helppo saatavuus. Haittoina ovat aiheutuneet päästöt, polttoaineiden rajallisuus sekä riippuvuus sekä hinta.

Koska energiatuotannon siirtyminen täysin hiilivapaaseen tuotantoon on hidasta ja hintavaa, on syytä pohtia mahdollisten nykyisten polttoainepohjaisten lämmöntuotantomuotojen muuttamista hybridijärjestelmiksi.

Hybridijärjestelmien hyödyntäminen fossiilisten polttoaineiden käyttämissä järjestelmissä on ympäristöystävällisempi vaihtoehto, sillä se toimiessaan vähentää polttoainejärjestelmän polttoaineen kulutusta ja täten ympäristöpäästöjä. Hybridi polttoainejärjestelmiä voivat olla täten osa ratkaisua ilmaston muutoksen hillitsemisessä, erityisesti jos päästöjä halutaan verrattain edullisesti. (Heinen;Burke;& O'Malley, 2016).

Polttoainepohjaiset hybridilämmitysjärjestelmät sisältävät primääri- tai sekundäärienergianlähteenä polttoainetta, mikä hyödynnetään suoraan lämmityskohteessa. Riippuen rakennuksen käyttökohteesta ja energiankulutuksesta, sekundäärilämmityksen lähteenä toimii yleisesti sähkö, joko välillisesti (lämpöpumput) tai välittömästi (sähkövastukset).

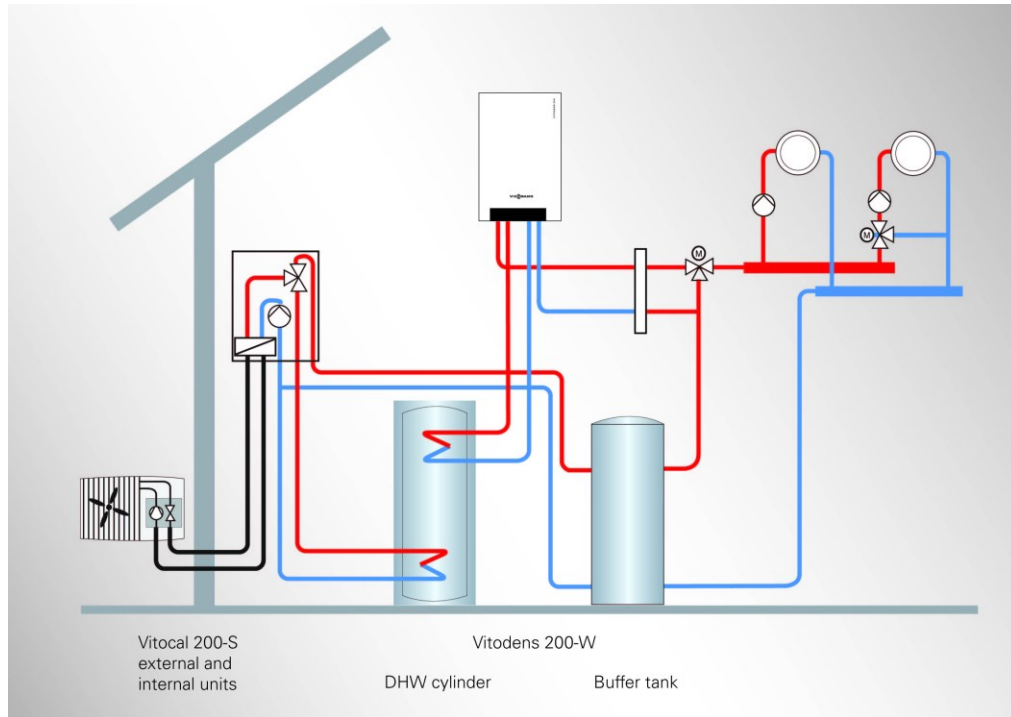
Yleisperiaatteeltaan polttoainepohjaisten hybridilämmitysjärjestelmien toiminta perustuu paikalliseen säätöön ja automaatioon. Hybridijärjestelmä itsessään tasapainottaa ja kompensoi toisen vajaatoimintaa, tai vastaavasti rajoittaa toisen energiatuotantomuodon toimintaa täysin. Esimerkiksi kovilla pakkasilla tai kausina, milloin toisen lämmöntuotantomuodon käyttäminen ei ole kannattavaa tai edes mahdollista. Koska polttoainejärjestelmät ovat verrattain yksinkertaisia, voi säätö tapahtua todella nopeasti.

Polttoainepohjaisia hybridijärjestelmiä ovat esimerkiksi kattila-vastusjärjestelmä, kattila lämpöpumppujärjestelmä tai kattila- aurinkopaneelijärjestelmä. (Heinen;Burke;& O'Malley, 2016)

3.4.1 Lämpöpumppu- kattilajärjestelmä

Lämpöpumppu-kattilahybridijärjestelmä (Hybrid Heat Pump- and Boiler system, HP-B), on systeemi, missä rakennuksen lämpö tuotetaan pääosin lämpöpumpulla Ainoastaan

huippukulutuksen (kovat pakkaset tai muu energiankulutus) osa lämmöstä, tuotetaan kattilajärjestelmällä. (Heinen;Burke;& O'Malley, 2016). Yleisesti kattilan polttoaineena toimii joko maakaasu tai öljy, mutta myös puu tai biokaasua käyttävä järjestelmä on mahdollinen. Alla olevassa kuvassa on esitetty järjestelmän peruseriaate.



Kuva 4. Ilmavesilämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmä, saatavilla: <http://www.plumb-line.co.uk/renewable-energy-solutions/hybrid-systems/>

Riippuen järjestelmässä toimivan lämpöpumpun toimintaperiaatteesta, käytetään järjestelmiä tyypillisesti seuraavasti.

Ilmailmalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmä: Lämpöpumppu toimii ainoastaan tilojen lämmityksessä ja jäähdytyksessä. Tilojen lämmitys tapahtuu puhaltimilla lämpöpumpun osalta ja patteri/lattialämmityspiireillä kattilalämmityksen osalta. Lämmin käyttövesi lämmitetään pelkästään kattilalämmityksellä. Jotta järjestelmää voidaan pitää hybridijärjestelmänä, eikä kahtena erillisenä lämmitysjärjestelmänä, täytyy järjestelmien olla yhteydessä toisiinsa jollain tavalla.

Ilmavesilämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmä: Lämpöpumppu toimii tilojen ja käyttöveden lämmityksessä. Joko välillisesti lämmönvaihtimen avulla, missä ensiöpiirinä toimii lämpöpumpun oma lämpöpiiri ja toisiopiirinä rakennuksen lämmityspiirit, tai välittömästi, missä ilmavesilämpöpumpusta saatava lämmin vesi syötetään suoraan lämmityspiireihin, kuten Kalaholman koulun tapauksessa. Kattilalämmityksellä kompensoidaan lämmityksentarvetta tilanteissa, missä lämpöpumpun teho ei riitä.

Vesivesi lämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmä (maalämpöpumppu). Lämpöpumppu syöttää lämmintä vettä suoraan lämmityspiireihin ja lämmittää käyttövettä lämmönvaihtimen avulla. Kattilalämmityksellä kompensoidaan lämmityksentarvetta tilanteissa, missä lämpöpumpun teho ei riitä.

Lämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmä järjestelmä toimii siis kahtena erillisenä systeeminä, missä lämpöpumppu lämmittää rakennusta perustuen sille määritettyjen parametrien perusteella. Heti, kun lämpöpumpun suorituskyky ei riitä ylläpitämään haluttuja olosuhteita, automaatio ja ohjausjärjestelmä käynnistää kattilajärjestelmän, mikä toimii rinnakkain lämpöpumpun kanssa tuottaen lämpöä rakennukselle. Myös tilanteessa, missä lämpöpumppu lakkaa toimimasta kokonaan, kattilalla voidaan tuottaa rakennuksen koko lämmöntarve.

Lämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmä voi integroida sähkö-, lämmitys- ja kaasujärjestelmät yhdeksi kokonaisuudeksi, millä voidaan parantaa energijärjestelmän mukautuvuutta, sekä tuoda tasapainoa lämmöntuotannossa, epätasaisille primäärienergian lähteille, kuten aurinko- ja tuulienergialla tuotetun sähkön rinnalle (Heinen;Burke;& O'Malley, 2016). Vastaavasti, kun uusiutuvalla energialla tuotetusta sähköstä on ylitarjontaa, voi järjestelmä vaihtaa lämmityksensä takaisin sähköllä toimivaksi, vaikka se hetkellisesti ei olisikaan kannattavin vaihtoehto lämmittää rakennusta (Kiviluoma, ym., 2017).

3.4.2 Sähkövastus- kattilahybridijärjestelmä

Sähkövastus- kattilahybridijärjestelmässä (Hybrid Boiler- and Resistor system, HB-R) primäärienergian lähteenä on kaas- tai öljykäyttöinen kattila, millä tuotetaan rakennuksen lämmitystarve ja sekundäärinenä lämmönlähteenä säädettävä vastuslämmitin. Vastuslämmitin voi sijaita joko suoraan kattilan sisällä, kattilain palaavassa menovesiputkessa, tai itse lämmitettävässä tilassa (Heinen;Burke;& O'Malley, 2016).

Vastusjärjestelmän etuna hybriditeknikkana muihin hybridijärjestelmiin on niiden verrattain edullinen investointikustannus, ja se, että järjestelmä voidaan automaation avulla integroida olemassa olevaan kattilajärjestelmään (Heinen;Burke;& O'Malley, 2016). Hybridivastusjärjestelmän hyödyt verrattuna suorasähköllä lämmittäessä verrattuna suorasähköön ovat taas sen joustavuus ja säädettävyyys.

Lämmöntarve rakennuksissa voivat vaihdella suuriakin määriä jopa tunnin tarkkuudella, mikä voi aiheuttaa suuriakin piikkejä ja kuormitusta sähköverkolle. Tätä vaihtelua ja epätasaisuutta on helpompaa kompensoida rakennuksen omalla kattilajärjestelmällä. (Kiviluoma, ym., 2017). Ympäristön näkökulmalta vastusjärjestelmä tulisi mitoittaa siten, että sen käyttö voidaan toteuttaa hyödyntäen uusiutuvaa sähköenergiaa (Heinen;Burke;& O'Malley, 2016).

Polttoainepohjaisten kattilajärjestelmien integroiminen sähkölämmityksellä toimivaan rakennukseen ei kuitenkaan ole ympäristön kannalta vartenotettava vaihtoehto, joten sen käyttöä tulisi rajoittaa ainoastaan rakennuksiin, missä lämpöpumpun käyttö ei ole mahdollista, tai minne keskitetyllä voimalaitoksella tuotettava lämpö tai sähkö on liian kallista tuoda.

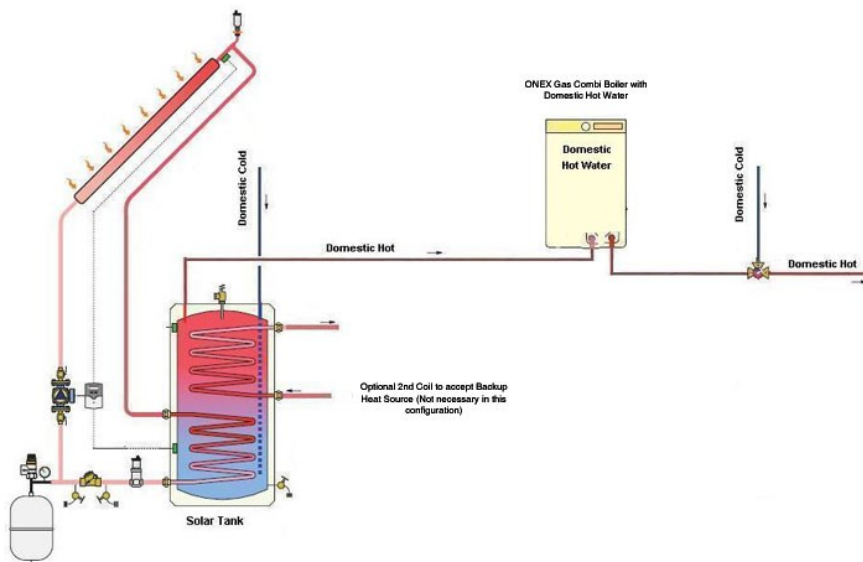
Sen sijaan, jo olemassa oleviin rakennuksiin, missä on entuudestaan käytössä kattilalämmitysjärjestelmä, ylimääräinen sähkövastuslämmitysjärjestelmä on verrattain edullinen ratkaisu pienentämään polttoainekustannuksia. Sähkövastusten käytön kannalta on tärkeää, että energiakustannukset (sähkön hinta) ja sähkön tuotantomuoto oikeuttavat niiden käytön.

3.4.3 Aurinkopaneeli- kattilahybridijärjestelmä

Aurinkopaneeli- kattilahybridijärjestelmän kehitys ja tutkimus on kasvanut 2000-luvulta lähtien (Minsta Do Ango;Levêque;Holaind;Henry;& Leroux, 2019). Kattila-aurinkopaneelijärjestelmässä polttoainetta käyttävän kattilajärjestelmän on integroituna aurinkopaneelijärjestelmä.

Aurinkopaneelijärjestelmän tehtävä on kaksitahoinen. Sen tehtävänä on tuottaa sähköä kattilajärjestelmien sähkökomponenteille, kuten pumpuille ja polttimolle, sekä lämmintä käyttövettä suoraan kattilain vähentäen näin öljyn tai kaasun kulutusta. (Minsta Do Ango;Levêque;Holaind;Henry;& Leroux, 2019) & (Tamvakidis;Firfiris;Martzopoulou;Fragos;& Kotsopoulos, 2015)

Aurinkopaneelien toimintaperiaate hybridijärjestelmässä on esitetty alla olevassa kuvassa.



Kuva 5. Aurinkopaneeli- kaasukattilahybridijärjestelmä, saatavilla: <https://www.houseneeds.com/learning-center/learning-center-solar/solar-panels-domestic-water-space-heating-pre-heating-gas-combi-boiler-6>

Järjestelmä voi toimia kahdella eri periaatteella. Aurinkopaneelit tuottavat lämmintä vettä, mikä pumpataan kattilapiiriin, missä sitä jälki-lämmitetään tarvittavaan lämpötilaan, tai siten, että aurinkopaneelit tuottavat kattilalle sähköä, joka lämmittää veden kokonaan itse. (Heinen;Burke;& O'Malley, 2016).

Aurinkopaneelijärjestelmän etuna esimerkiksi kattila-vastusjärjestelmän verrattuna onkin sen mahdollisuus tuottaa sähköä itse hybridijärjestelmän komponenteille, ja vastaavasti mahdollistaa osittain omavarainen energiantuotanto rakennuksessa ainakin teoriassa.

Aurinkopaneeli- kattilahybridijärjestelmän käyttö lämmitystarkoituksissa on kuitenkin pohjoisten olosuhteiden takia haastava energiantuotantomenetelmä. Hybridijärjestelmän

aurinkopaneelien lämmöntuotanto kärsii suuresti talvella, milloin auringon säteily on vähäistä, ja jolloin kuitenkin lämmitystarve on suurinta. Toisaalta taas kesällä ja keväällä, milloin auringosta saatavaa energiaa on runsaammin tarjolla, ei tarvetta tilalämmitykselle aina ole, joten on tärkeää, että ylimääräinen energia voidaan hyödyntää käyttökohteessa, tai vastaavasti siirtää muualle, missä sille on tarvetta.

Aurinkopaneeli- kattilahybridijärjestelmän olisikin suosiollista pohjoisissa olosuhteissa pystyä tuottamaan myös lämmintä käyttövetä, jolloin aurinkopaneeleista saatava lämpöenergia saadaan hyötykäyttöön. Vastaavia järjestelmiä on olemassa ja yleisesti käytössä monissa maissa (Jeong;Gyung Yu;& Nam, 2017) & (Dannemand;Perers;& Furbo, 2019).

3.5 Uusiutuvaa energiaa hyödyntävät hybridijärjestelmät

Uusiutuvien energiamuotojen käyttäminen primäärienergian lähteenä on ollut hidasta johtuen osittain energiamuotojen kalliista investointikustannuksista suhteessa ei uusiutuviin energialähteisiin (Frisk, 2017). Muutoksen aikaansaantia ovat myös rajoittaneet uusiutuvien energialähteiden riippuvaisuus olosuhteisiin (tuulettomat ja vähän aurinkosäteilyä saavat alueet), sekä olemassa olevan infrastruktuurin puuttuminen.

Kuten luvussa 3.2 todettiin, myös huippukulutuksen aiheuttamat piikit, sekä primäärienergian kapasiteetin riittäminen on pelkästään uusiutuvaa energiaa tuottavilla voimalaitoksella nopealla aikavälillä hankalaa. Erityisesti lämmöntuotantoon Suomessa keskitetyt uusiutuvaa energiaa käyttävät järjestelmät, mitkä palvelisivat isoja asuinalueita, ovat hankalia toteuttaa edullisesti ja nopeasti.

Uusiutuvien energialähteiden riippuvuutta olosuhteisiin ja sen aiheuttamia mahdollisia piikkejä tai puutteita sähkö- tai lämpöverkkoon voitaisiinkin kompensoida rakennus- tai pienvyöhykekohtaisilla hybridijärjestelmillä, mitkä käyttävät energialähteenään uusiutuva energiatuotantomuotoja.

Uusiutuvaa energiaa hyödyntävien hybridijärjestelmien edut polttoainepohjaisiin hybridijärjestelmiin tai energiatuotantomuotoihin, ovat niiden riippumattomuus polttoainesta ja samalla niiden hintavaihteluista ja saatavuudesta. Riippuen siitä, mitä primäärilämmön lähteenä käytetään, voi järjestelmä olla hyvinkin luotettava, pitkäikäinen ja ympäristöystävällinen. (Ruokamo, 2016).

Hybridijärjestelmiä voitaisiin hyödyntää myös isommassa mittakaavassa. Jokaista tyypillistä uusiutuvan energianlähdetä, kuten vesi-, tuuli- ja aurinkoenergiaa on mahdollista hyödyntää hybridijärjestelmissä Esimerkiksi, kuten hiljattain Portugaliin valmistuneessa (2017) hybridi vesi- ja aurinkovoimalaitoksessa on hyödynnetty (Kaufman, 2017).

Uusiutuvia energiamuotoja hyödyntäviä hybridijärjestelmiä ovat rakennusten ja piensektorien mittakaavassa tyypillisesti eri lämpöpumppujen – aurinkopaneelien ja biopolttoainetta käyttävien kattilaen yhdistelmiä. Vaikka Suomessa rakennusten tasolla tuuli- sekä aurinkovoiman tuotannon osuus ei ole kovin suurta, ei tuuli- ja aurinkovoiman rooli hybridijärjestelmissä ei kuitenkaan ole täysin poissuljettu, sillä ideaalissa hybridijärjestelmässä primäärienergian lähteenä toimii paikallinen lämmön ja sähköntuotantojärjestelmä, ja sekundäärijärjestelmä (varajärjestelmänä) toimii koko lämmön ja sähkönkulutuksen kattava uusiutuvaa energiaa tuottava järjestelmä (Heinen;Burke;& O'Malley, 2016).

Näin voidaan taata tasainen sähkön ja lämmöntuotanto myös tilanteissa, missä paikallinen energiantuotantojärjestelmä ei olosuhteiden, tai huoltotoimintojen takia pysty tuottamaan tarpeeksi energiaa. Tämä voisi konkreettisesti tarkoittaa esimerkiksi lämpöpumppu- sähkövastushybridijärjestelmääjärjestelmää, missä sekä lämpöpumpun tarvitseva sähkö, sekä suorasähkölämmitys, tuotetaan uusiutuvalla energialla. (Heinen;Burke;& O'Malley, 2016).

3.5.1 Hybridi aurinkopaneelijärjestelmät

Aurinkopaneelijärjestelmät hybridilämmöntuotannossa, ovat joko toimintatavoiltaan erilaisien aurinkopaneelien, tai aurinkopaneelien ja toisen lämmitysjärjestelmän yhteistointia. Toimintatavoiltaan erilaisilla aurinkopaneeleilla tarkoitetaan tässä tapauksessa joko pelkästään aurinkopaneeleja, mitkä tuottavat pelkästään sähköä, tai termisiä aurinkopaneeleja.

Termisellä aurinkopaneelijärjestelmällä (Photovoltaic/Thermal-system, PVT) tarkoitetaan järjestelmää, missä aurinkopaneelin pinnalle muodostunut lämpö kerätään talteen. Tämä parantaa aurinkopaneelien energiantuotannon hyötysuhdetta, sillä aurinkopaneelin pinnan lämpiäminen heikentää paneelin suorituskykyä (Jeong;Gyung Yu;& Nam, 2017) & (Lamnatou & Chemisana, 2016) . Kerätty lämpö voidaan hyödyntää rakennuksen lämmityksessä.

PVT järjestelmässä aurinkopaneeli ja keräin ovat liitettynä toisiinsa. Paneelin takapuolella on lämmönsiirtojärjestelmä (yleensä vesi tai ilma), minkä avulla lämpö otetaan talteen ja siirretään pois paneelin pinnalta (Jeong;Gyung Yu;& Nam, 2017). Jos paneeleista otettu lämpö hyödynnetään toisessa järjestelmällä (lämmityksessä), voidaan järjestelmää kutsua hybridi PVT-järjestelmäksi (Lamnatou & Chemisana, 2016).

PVT-järjestelmien energiatuotanto suhteessa asennuspinta-alaan on korkeampi kuin erillisten vastaavan kapasiteetin aurinkopaneelin ja aurinkokeräimen yhteispinta-ala. (Manolis;Nektarios;Giorgos;& Angeliki, 2018). Tämä mahdollistaa potentiaalisemman PVT- tai hybridi-PVT-järjestelmien hyödyntämisen osana rakennuksen energiajärjestelmiä, varsinkin tilanteissa, missä käytettävä pinta-ala järjestelmille on rajallinen (Lamnatou & Chemisana, 2016).

Eräissä matalalämpötilaisissa lämmityskohteissa, kuten esimerkiksi, uimahallien altaiden vesien lämmityksessä, edullinen vesikiertoinen PVT/w (Photovoltaic/Thermal and water system) järjestelmän implementointi voi olla kannattavaa (Chow, 2010), kuten esimerkiksi Porin uimahallin tapauksessa on tehty (Porin energia, 2019).

Vesikiertoinen PVT-järjestelmä on toimiva ratkaisu erityisesti alueilla, missä lämpötila pysyy plussan puolella ja missä tarvitaan lämmitystä rakennuksissa, jotta järjestelmästä voidaan saada hyödyksi sekä sähkö- että lämpöenergia. Kylmissä olosuhteissa, vesikiertoiseen lämmönsiirtojärjestelmään tulee lisätä jäätymissuojanestettä, mikä kuitenkin huonontaa PVT-järjestelmän hyötysuhdetta kesäolosuhteissa (Chow, 2010).

Osittain tästä syystä erityisesti Suomessa, PVT-järjestelmien tarpeellisuus ja kannattavuus on kyseenalaista. Tästä riippumatta, Aldubyanin ja Chiassonin (2017) mukaan PVT-järjestelmien, hyötysuhde sähköntuotannon osalta on, joskin huomattavasti huonompaa

talvella kuin kesällä yleisesti, parempi, kuin PV-paneelien niin kylmissä kuin kuumissa-kin olosuhteissa. Täten PVT ja erityisesti hybridi PVT-järjestelmien hyödyntämistä Suomenkin olosuhteissa, olisi syytä tutkia, jos asiaa tarkastellaan pelkästään energiantuotannon ja ympäristön näkökulmasta.

3.5.2 Lämpöpumppu- sähkövastushybridijärjestelmä

Lämpöpumppu- sähkövastushybridijärjestelmä Hybrid Heat-pump and resistor system, HP-R) toimii siten, että lämpöpumpun rinnalla toimii vastusjärjestelmä, missä lämmitys toteutetaan sähkövastuksilla. Järjestelmä on toimintaperiaatteeltaan hyvin saman tapainen kuin hybridi kattila- vastusjärjestelmä, vaihtaen lämmitystapaa perustuen siihen, milloin kumpakin eri hetkinä on edullisinta käyttää, poikkeuksena se, että lämmitysmuotona on lämpöpumppu kattilan sijaan.

Vaikka molemmat järjestelmät toimivat pelkästään sähköllä (vastusjärjestelmässä sähkö toimii lämmönlähteenä ja lämpöpumppujärjestelmässä sähköä käyttävät lämpöpumpun komponentit), ja lämpöpumppujen suorituskyky on lähtökohtaisesti lämmöntuotannossa moninkertainen verrattuna suorasähkölämmitykseen (lämpöpumppujen COP), on hybridi lämpöpumppu- vastusjärjestelmän käytössä etuja pelkkään suorasähkölämmitysjärjestelmään.

Lämpöpumppujen hyötysuhde ja COP-arvo on huonommillaan, kun lämpötila lämmitettävän tilan ja ulkoilman kanssa on suurimmillaan, esimerkiksi hyvin kuumalla tai kylmällä kelillä. Tästä seuraa, että kylmällä kelillä, lämpöpumpun todellinen suorituskyky on reilusti alle ilmoitetun arvon (Heinen;Burke;& O'Malley, 2016). Kyseinen tilanne on yleinen erityisesti ilmalämpöpumppujen tapauksessa ja se ilmenee usein siten, että kovilla pakkasilla lämpöpumppu ei itsessään riitä ylläpitämään haluttuja olosuhteita.

Lämpöpumppu onkin joissain tapauksissa hyödyllistä yhdistää hybridi-lämpöpumppu-vastusjärjestelmäksi, missä primäärilämmön lähteenä toimii sähkölämmitys, jota lämpöpumppu kompensoi. Etuna pelkän lämpöpumpulla lämmittämiseen on se, että sähkölämmityksen yhteyteen suunniteltu lämpöpumppu voidaan mitoittaa huomattavasti pienemmäksi, saaden samalla investointikustannuksia pienemmäksi. (Heinen;Burke;& O'Malley, 2016)

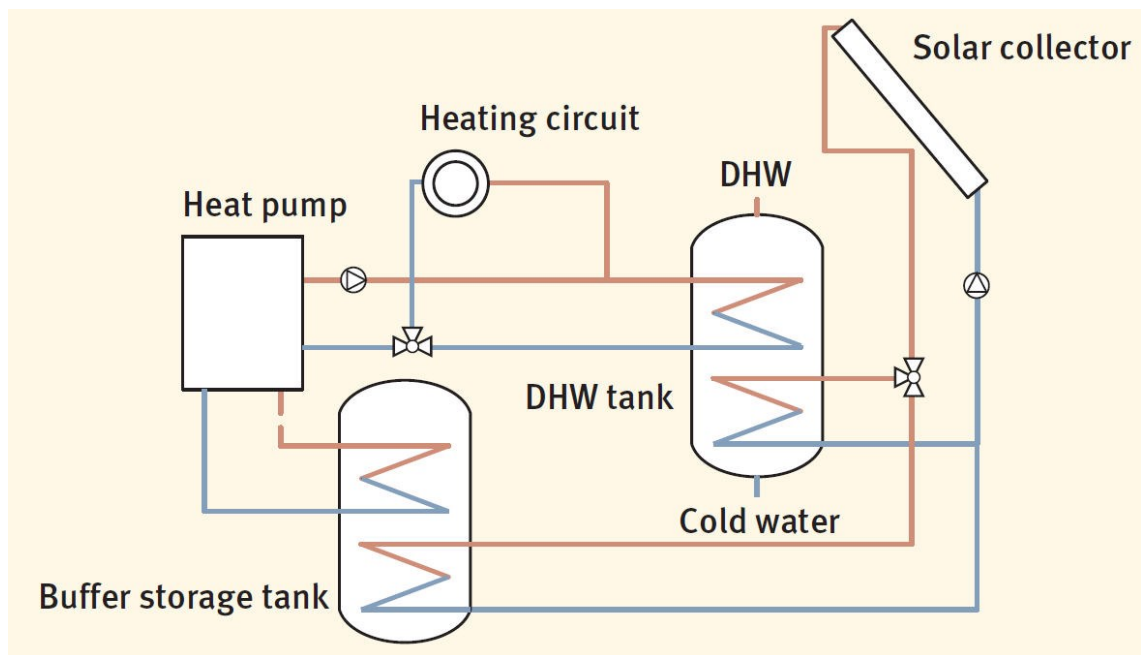
Kuten kattilajärjestelmän tapauksessa hybridi lämpöpumppu- ja vastusjärjestelmä voi vaihdella eri järjestelmien välillä riippuen siitä, kuinka paljon lämpöpumpusta saadaan lämpöä ulos ja siitä, mitä sähköä verkossa on tarjolla. Kun uusiutuvasta sähköenergiasta on ylitarjontaa, voi järjestelmä käyttää suorasähköä lämmitysmuotona, vaikka lämpöpumpun käyttö olisi otollisempaa. (Heinen;Burke;& O'Malley, 2016)

3.5.3 Aurinkopaneeli- lämpöpumppuhybridijärjestelmä

Aurinkopaneeli- lämpöpumppuhybridijärjestelmäjärjestelmä on järjestelmä, missä lämpöpumpun (maa- tai ilmalämpöpumpun) lisäksi on aurinkopaneeli- tai aurinkokeräinjärjestelmä. Aurinkopaneeli- lämpöpumppuhybridijärjestelmäjärjestelmä tunnetaan yleisesti myös nimellä: ”Solar Assisted Heat Pump” (SAHP) (Safijahansa, 2019).

SAHP-järjestelmässä lämpöpumppu ja aurinkopaneelit voidaan kytkeä joko toimimaan sarjassa tai rinnakkain. Rinnan kytketyissä järjestelmissä molemmat lämpöpumppu ja aurinkopaneelit ovat omia itsenäisiä järjestelmiä, tuottaen joko sähköä tai lämpöä käyttäjälle. Sarjaan kytketyssä järjestelmässä toinen järjestelmä, (yleensä aurinkopaneelit) ovat kytkettynä toisen järjestelmän (yleensä lämpöpumppu) lämmöntuotantopiiriin. (Safijahansa, 2019) & (Taehoon;Byung-II;Yong-Shik;& Hyung Do, 2018)

Kuvassa 6 on esitetty sarjaan kytketty järjestelmä.



Kuva 6. Sarjaan kytketty järjestelmä, saatavilla: https://www.google.com/search?q=solar+assisted+heat+pump&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjG8KuJ0vXhAhXhtYsKH-bueAT8Q_AUIDigB&biw=1707&bih=884#imgrc=7glrONbEiOjaGM:

Sarjaan kytketyssä järjestelmässä aurinkopaneeli voidaan kytkeä lämpöpumpun höyrystimen piiriin siten, että sen tuottama energia nostaa höyrystimelle menevän välittäjäaineen lämpötilaa, parantaen lämpöpumpun suorituskykyä. Aurinkopaneelit voivat lämmitellä höyrystimelle menevää välittäjäainetta joko erillisen lämmönvaihtimen avulla, tai järjestelmällä, missä välittäjä aina kiertää aurinkopaneelien takana erillisissä kapilaariputkistoissa. Putkistot vastaanottavan aurinkopaneelien saaman lämpöenergian samalla viilentäen aurinkopaneelien pintalämpötilaa ja parantavat aurinkopaneelin sähköntuotantokykyä. (Cai;Li;& Zhou, 2019) & (Taehoon;Byung-II;Yong-Shik;& Hyung Do, 2018)

Aurinkopaneelien tuottamaa lämpöä voidaan käyttää myös maalämpöpumppujen porakaivojen lataamiseen. Lataamisella tarkoitetaan tilannetta, missä aurinkopaneeleista saatu lämpöenergia varastoidaan lämpöpumppujärjestelmän porakaivoihin, nostaen niiden lämpötilaa, ja parantaen lämpöpumpun suorituskykyä. (Dannemand;Perers;& Furbo, 2019)

4 Hybridijärjestelmien analyysimenetelmät

Seuraavassa luvussa esitellään tässä työssä käytetyt simulointi- ja mallinnusmenetelmät. Luvussa esitellään käytetyt ohjelmistot, niiden käyttötarkoitus, sekä hybridijärjestelmien kannattavuuden analysoinnissa käytettyjä menetelmiä.

4.1. Simulointiohjelmat

Hybridijärjestelmien mallintaminen ilman sopivaa ohjelmistoa voi olla haastavaa, sen monitahoisuuden vuoksi. Luotettavien tuloksien saaminen mallintamisen ja ohjelmoinnin avulla, on syytä edellyttää, että käytetyt ohjelmistot pystyvät käsittelemään suuria määriä dataa (sää olosuhteita, rakenteita, rastereita ym.).

Hybridijärjestelmien mallintamiseen on tarjolla kaupallisia ohjelmistopaketteja niin yritys, kuin yksityiskäyttöön. Ohjelmistoja on käytössä useita, ja yrityksen käytössä ohjelmistot valikoituvat yleensä käyttötarkoituksen mukaan.

Tämän diplomityön tapaustutkimuksen tapauksessa mallintaminen on tapahtunut käyttäen kahta ohjelmistoa: MagiCAD-comfort and Energy (MagicCAD Room) sekä Indoor Climate and Energy (IDA-ICE) ohjelmistoa.

4.1.1 MagiCAD Room ohjelmisto

MagiCAD Room on MagiCAD-Groupin tarjoama MagiCAD for Autocad sovelluksessa toimiva rakennuksen ja tilojen 3D-tilammallin luomiseen tarkoitettu ohjelmisto. MagiCAD-Roomin käyttäminen edellyttää lisenssiä ja joko AutoCAD- tai Revit-ohjelmistoa. Tämän työn yhteydessä MagiCAD-Roomia käytettiin AutoCAD ohjelmiston avulla.

3D-mallin luominen tapahtuu piirtämällä tasokuvaan rakenteita/seiniä, ja määrittelemällä erikseen rakenteiden korkeudet. Piirrettyä mallia voidaan helposti muokata eri työkaluilla, kuten siirto-, leikkaus- tai levennystoiminnoilla. Piirrettyyn malliin voidaan lisätä ikkunoita, ovia tai kattorakenteita.

MagiCAD-Room sovelluksella voi myös määrittää rakennuksen tiloja. Tiloihin voidaan asettaa yksilöityjä olosuhdeasetuksia. Olosuhteina voidaan määrittää esimerkiksi, tilojen sisälämpötilan asetusarvoa, tuloilman lämpötilaa, vuotoilman osuutta, ilmamääriä (poisto ja tulo), sekä kattopinta-alan osuutta huoneen pinta-alasta.

MagiCAD-Room laskee automaattisesti tilojen lämpöhäviöt rakenteiden läpi, sekä ilmanvaihdosta/vuotoilmasta aiheutuvat lämpöhäviöt. Lämpöhäviöt ja tilojen muut tiedot voidaan ottaa helposti ulos ohjelmistosta esimerkiksi .xls tiedostona. Jäähdytyslaskelmia tai olosuhdesimulointia MagiCAD-Room sovelluksella ei kuitenkaan voi tehdä.

Mallin luomisen jälkeen, malli voidaan myös tulostaa BIM-tiedostona, (Building Information Modeling) jota voidaan jatkoanalysoida muissa sovelluksissa. BIM-malli voidaan luoda niin tiloista, kuin käyttäjien määrittelemistä vyöhykkeistäkin.

4.1.2 Indoor Climate and Energy IDA-ICE

Indoor Climate and Energy (IDA-ICE) on Equan tarjoama sisäilmaston ja olosuhteiden mallintamiseen tarkoitettu ohjelmisto. IDA-ICE ohjelmistolla on myös mahdollista tehdä energiasimulointia laskea rakennuksen E-lukuja sekä tutkia energiajärjestelmien toimivuutta rakennuksessa.

IDA-ICE on ominaisuuksiltaan ja käytettävyydeltään huomattavasti monipuolisempi, kuin MagiCAD-Room ohjelmisto. IDA-ICE:n avulla on mahdollista mallintaa rakennuksen rakenneosat erittäin tarkasti. Ohjelmiston käyttö perustuu siihen, että käyttäjällä voi vaihdella analysoitavan rakennuksen kaikkia parametrejä, parantamalla vähitellen mallinsa tarkkuutta. (Equa, 2019)

IDA-ICE ohjelmistolla voidaan suoraan piirtää rakennuksen malli kuten MagiCAD-Roomin tapauksessa. Tämän lisäksi ohjelmistoon voidaan ladata rakennuksen BIM-malli, jota voidaan muokata suoraan ohjelmistossa. Ohjelmistoon on myös ladattu lukuisia eri rakennetyyppejä ikkunoille, oville, seinille ja katto sekä lattioille, mitkä kaikki ovat käyttäjän itse määriteltävissä.

Olosuhdesimuloinnissa on mahdollista määritellä myös tarkasti laitteistojen käyttöajat, ilmanvaihtokoneiden tyypit ja palvelualueet, energiajärjestelmien parametrit (lämpötilat, massavirrat ja nesteet), tilojen käyttöasteet ja lämmitys/jäähdytysjärjestelmät ja aikataulut.

Hybridijärjestelmien analysointiin IDA-ICE sovellusta voidaan käyttää tiedettävästi, jos ei suoraan, niin ainakin sovelletusti. IDA-ICE järjestelmästä pystyy lataamaan tietopankista rakennukselle paikkakuntaakohtaiset tuuli- ja aurinkosäteilyprofiilit, joita hyödynnetään vuosittaisessa energiankulutuksen ja ostoenergian tarpeen määrittelyssä. Ohjelma antaa ulos selkeän taulukon, missä rakennuksen käyttö- ja ostoenergia on esitelty kuukausittain

4.2 Elinkaarianalyysi

Elinkaarianalyysi (life cycle calculation, LCC) on tehokas keino arvioida investoinnin kannattavuutta. Elinkaarianalysoiminen on LVI- ja energiatekniikan kannalta tärkeä työkalu, erityisesti tilanteissa, missä käyttäjä pyrkii vähentämään energiankulutusta tai parantamaan energiatehokkuutta. (Sirén, 2016)

Elinkaarianalyysi rakennuksissa perustuu pohjimmiltaan analysointitavasta poikkeamatta siihen, että säästöä tuovan investoinnin kannattavuutta katsotaan sen tuomien säästöjen, sekä investoinnin hinnan perusteella. Tässä työssä elinkaarianalyysi on tehty hybridijärjestelmälle käyttäen kahta menetelmää: takaisinmaksuaika (payback method), sekä nykyarvomenetelmä (NPV, Net Present Value).

4.2.1 Takaisinmaksuaika

Takaisinmaksuajalla (payback method) tarkoitetaan aikaa, milloin investoinnista syntyneet säästöt ylittävät alkuinvestointikustannukset. Takaisinmaksuaikaa voidaan tarkastella kahdella periaatteella, yksinkertaistetulla, sekä diskontatulla menetelmällä.

Yksinkertaistettu takaisinmaksuaika

Yksinkertaistettu takaisinmaksuaika (Simple payback method) on nopea ja yksinkertainen keino arvioida investoinnin kannattavuutta. Yksinkertaistettu takaisinmaksuaika lasketaan seuraavalla kaavalla (Sirén, 2016).

$$P = \sum_{k=1}^N \frac{A_k}{(1+i)^k} - I_0 \quad (1)$$

missä A_k on vuosittainen säästö (€)
 I_0 on alkuinvestoinnin hinta (€)
 k ja N ovat investoinnin takaisinmaksuun kuluva tarkasteluväli (yr)

Investointi on yksinkertaisessa takaisinmaksumenetelmässä kannattavaa, aina jos sen takaisinmaksuaika on pienempi, kuin investoinnin elinikä N_I , eli $N < N_I$ (Sirén, 2016).

Diskontattu takaisinmaksuaika

Diskontatussa takaisinmaksuaikamenetelmässä investoinnin kannattavuutta arvioidaan samalla periaatteella, kuin yksinkertaistetussa takaisinmaksuajassa, vertaamalla investoinnin kustannuksia ja vuosittaista tuottoa. Ero menetelmien välillä on kuitenkin se, että diskontattu takaisinmaksuaikamenetelmä ottaa huomioon investoinnin tuoton suhteessa rahan arvon nousuun. (Sirén, 2016)

Investoinnin kannattavuus, riippuen asetetusta korkotasosta, tuottaa vuosi vuodelta vähemmän, koska siinä kiinni olevan rahan arvo laskee suhteessa siihen, että raha olisi sijoitettu esimerkiksi osakkeisiin tai muihin arvopapereihin.

Yksinkertaisimmillaan diskonttausmenetelmää voidaankin tulkita seuraavasti: onko kannattavaa investoida säästöä tuottavaan laitteeseen tai materiaaliin, vai investoida investointiin käytettävä raha, jonka tuotoilla voidaan saada enemmän rahaa, kuin mitä säästöillä saadaan?

Diskontattu takaisinmaksuaika lasketaan seuraavalla kaavalla (Sirén, 2016).

$$P = A \frac{1-(1+i)^{-N}}{i} - I_0 = 0 \quad (2)$$

missä i on korkotaso
 A on vuosittainen säästö (€)
 N on takaisinmaksuaika (yr)
 I_0 on alkuinvestoinnin hinta (€)

Mistä voidaan ratkaista takaisinmaksuaika N seuraavasti (Sirén, 2016).

$$N = \frac{\ln\left(1 - \frac{I_0}{A}\right)}{\ln\left(\frac{1}{1+i}\right)}, \quad (3)$$

4.2.2 Nykyarvomenetelmä

Nykyarvomenetelmä on huomattavasti monipuolisempi keino arvioida investoinnin kannattavuutta, kuin takaisinmaksuaika. Nykyarvomenetelmässä otetaan huomioon Investoinnin arvo myös sen jälkeen, kun oletettu takaisinmaksuaika on ylittynyt, toisin kuin takaisinmaksumenetelmä. (Sirén, 2016)

Investoinnin nykyarvo lasketaan seuraavalla kaavalla (Sirén, 2016).

$$P = \sum_{k=1}^N \frac{T_k}{(1+i)^k} - \sum_{k=1}^N \frac{K_k}{(1+i)^k} - \sum_{k=1}^N \frac{I_k}{(1+i)^k} + \sum_{k=1}^N \frac{S}{(1+i)^n} \quad (4)$$

(Sirén, 2016)

Missä T_k on tuotto vuoden k lopussa (€)
 K_k on menot vuoden k lopussa (€)
 I_k investointikustannukset vuoden k lopussa (€)
 S on investoinnin jäännösarvo elinkaarianalyysin viimeisenä vuonna (€)

Laitteistolla voi olla jäännösarvoa myös tilanteessa, missä laitteiston käyttöikä on ylittynyt, sillä laitteistoa varten tehdyt asennukset, kuten putkimuutokset tai vastaavat voidaan mahdollisesti hyödyntää uuden laitteiston hankinnassa, ilman lisäkuluja.

Kaavassa 4 on nykyarvomenetelmän korkotasona käytetty vakioitua korkotasoa i . Riippuen käyttökohteesta nykyarvomenetelmän kertoimena tulisi käyttää niin sanottua todellista korkotasoa r . Korkotaso r ottaa huomioon esimerkiksi inflaation tai arvioidun polttoaineen/energian hinnan nousun.

Koska inflaation arvioiminen on hankalaa, ei sitä tässä työssä oteta elinkaarianalyysissä huomioon. Sen sijaan energian hinnan eskalaatio on huomioitu laskuissa. Energian hinnan eskaloitumien voidaan ottaa huomioon seuraavalla kaavalla (Sirén, 2016).

$$r_e = \frac{i - f_e}{1 + f_e} \quad (5)$$

Missä r_e on todellinen korkotaso energialle
 f_e on eskaloitumisaste.

5 Kalaholman koulun mallinnus

Seuraavassa käydään läpi, miten Kalaholman koulurakennukselle luotiin mallinnettava pohja, millä periaatteilla mallinnuksessa käytettävät mitoitusarvot valittiin, sekä miten mallinnus ja analysointi tapahtui. Lisäksi seuraavassa esitetään, millä pohjatiedoilla mallinnus on tehty, ja millä oletuksilla se on toteutettu.

5.1 Koulurakennuksen mallinnus

Mitoitusparametrien asettelemisella ja säätämisellä on tarkoitus tehdä koulurakennuksesta mahdollisimman paljon todellisuutta vastaava tilanne. Mitoitusparametreinä käytetään pääosin olemassa olevia tietoja rakennuksesta. Jos tietoa ei ole saatavilla, on mitoitusrvoiksi valittu rakennusvuoden aikaisia rakennusmääräysten D2, D3 ja D5 mukaisia arvoja. Kaikki tiedot koulun lämmitys ja LVI-järjestelmistä on saatu kohdekäynnin yhteydessä, tai aikaisemmista suunnitelmista.

Mainittuja mitoitusparametrejä on käytetty IDA-ICE -sovelluksessa järjestelmien parametreinä.

5.1.1 Ulkoiset- sekä järjestelmän mitoituslämpötilat

Mitoituslämpötiloina käytettiin seuraavan alla olevan taulukon mukaisia arvoja.

Taulukko 1. Mitoituslämpötilat

	°C
Ulkoilman lämpötila talvella	-26
Ulkoilman lämpötila kesällä	27
Vuoden keskilämpötila	-4,9
Tuloilman lämpötila, jäähdytys	18
Tavoitelämpötila	21

Ulkoilman lämpötilaksi talvella on valittu lämpötilavyöhykkeen I mukainen lämpötila (Ilmatieteenlaitos). Ulkoilman lämpötilaksi kesällä valittiin 27 °C. Kyseinen lämpötila asetettiin ainoastaan siksi, että lämpöpumput/jäähdytyspumput toimisivat mallissa oikein. Varsinaista jäähdytyksen tarvetta mallissa ei analysoitu.

Lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien mitoituksessa käytettiin alla olevan mukaisia arvoja.

Taulukko 2. Lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmän mitoituslämpötilat

	°C
Patteriverkoston lämpötila, lämmitys (meno/paluu)	70 / 40
Patteriverkoston lämpötila, jäähdytys (meno/paluu)	7 / 12
Käyttöveden lämpötila	59

Lämmitysmenetelmäksi valittiin kaikissa tiloissa vesipatterijärjestelmä. Vesipatterit mitoitettiin huoneissa riittävän isoksi (10 000 W), jotta voitaisiin tarkasti määritellä hybridijärjestelmän toimivuus mallissa. Todellisuudessa patterit mitoitettaisiin sopiviksi huoneiden lämpöhäviöiden perusteella, mutta koska tälle ei ole tarkastelussa tarvetta, ei sitä tehdä. Patteriverkoston menoveden lämpötila mitoitettiin 70 °C.

Muita ulkoisia mitoitusrvoja, kuten tuuli- tai aurinkosäteilymääriä ei määritelty ennalta. Analyysissä käytettiin IDA-ICE-ohjelmistossa olevia tietoja ja arvoja.

5.1.2 Tilojen mitoitusparametrit

Rakennusmääräysten D2 (1987) mukaiset tilojen mitoitusarvot, kuten ilmamäärät ja asetuslämpötilat koulurakennuksessa oleville tiloille, on esitetty alla olevassa taulukossa.

Taulukko 3. Tilojen mitoitusarvot

TILA	Ilman lämpötila °C	Ulkoilmavirta (siirtoilma = s)		Poistoilmavirta
		dm ³ /s, hlö	dm ³ /s, m ²	dm ³ /s, m ²
3.1 Luokkahuone	21	6	3	
3.2 Opetuslaboratorio	21	6	3	
3.3 Kotitalousluokka	21	6	3	
3.4 Tekn. aineiden luokka	21	6	3	
3.5 Voimistelusalijuhlasali	21	12	2	
3.6 Luentosali	21	8	6	
3.7 Ruokasali	21	8	6	
3.8 Aula/eteiskäytävä	21	6	5	
3.9 Opetusvälinevarasto	21			0,35

Huoneiden mitoituslämpötila rakennusmääräysten D2 (1987), tiloissa kuten WC, tai suihkutiloissa on 22 °C, mutta koska tiloista pinta-alaltaan ylivoimaisesti suurin osa on 21 °C mitoituslämpötilan piirissä, on tavoitelämpötilan asettaminen kaikissa tiloissa 21°C asteeseen riittävä.

Ilmamäärien mitoittamisessa tilanteessa, missä mitoitusmenetelmäksi on ilmoitettu kaksi eri vaihtoehtoa (esim. ihmismäärän tai pinta-alan mukaan), valittiin aina suuremman ilmamäärän antava arvo. Lisäksi oleskelutilat (opettajanhuoneet, luokkatilat ja kansliat on tasapainotettu siten, että tuloilma vastaa poistoilmaa.

Tasapainotuksen jälkeen, ilmamäärät vastaavat hyvin todellista tilannetta. Todelliset Keittiön koneen tulo- ja poistoilmamäärät ovat 0.58 /0.59 m³/s ja muita tiloja palvelevien koneiden 1.94/1.96 m³/s. Syötettyjen parametrien jälkeen, tiloissa olevien ilmamäärien

summat ovat n. 0.58 /0.59 m³/s, sekä 1.92/1.93 m³/s, mitkä vastaavat hyvin lähelle todellista tilannetta.

Koulurakennuksen lämpökuormien asettamisessa on noudatettu viimeisimmän rakennusajankohdan (2002) rakennusmääräyksen D3 (1987) mukaisia suosituksia. Rakennusmääräyksen D3 mukaan, lämpökuormat opetusrakennuksessa ovat allao levan taulukon mukaiset.

Taulukko 4. Koulurakennuksen lämpökuormien kertoimet

	W/m ²
Käyttöaste	0,6
Valaistus	18
Kuluttajalaitteet	8
Ihmiset	14

Kyseisiä lämpökuormia on käytetty kaikissa koulun tiloissa.

5.2 Hybridilämmitysjärjestelmien mitoitusparametrit

Lämmitysjärjestelmien mitoituksessa on käytetty osittain aikaisemmin määriteltyjä parametrejä, olemassa olevien laitteiden laitetietoja sekä laskettuja parametrejä. Mitoituksen lähtökohtana on, että laitteistot toimivat realistisesti mallissa ja että niiden tehot ovat todellisuutta vastaavia.

Kaikissa hybridijärjestelmien ja pelkän öljylämmitysjärjestelmän tapauksessa kattilan tehoksi on asetettu 160 kW, eli olemassa olevan kattilan teho.

5.2.1 Ilmavesilämpöpumpun mitoitus

Ilmavesi lämpöpumpun mitoituksessa noudatetaan pumpputoimittajalta saatuja arvoja. Menoveden lämpötilaksi asetetaan 65°C ja paluueden 55°C. vesivirta 3.0 l/s. Vesivirta täytyy olla vähintään tuo 3.0 l/s, jotta estetään koneen mahdollinen jäätyminen. Pumpun lämmitysteho on laitetoimittajan mitoituksen perusteella 10.5 -63.8 kW.

Laitetoimittajan mukaan 63.8 lämmitystehoon päästään vain ainoastaan täysin optimaalisisissa olosuhteissa (tehtaan mitoituskammiossa), ja lämmitystehoksi kannattaa asettaa jotain tältä väliltä, esimerkiksi 45 kW. 45kW on valittu tämän mitoituksen lähtökohdaksi.

5.2.2 Maalämpöpumpun tehon mitoitus

Maalämmön käytön parametrejä Kalaholman koulussa valittaessa, on käytetty seuraavia periaatteita. Ensiksi on katsottu, mikä olisi teoreettisesti järkevä lämpöpumpun teho koululle. Tämän jälkeen tarkastellaan maalämpökaivojen ominaisuuksia Porin leveyspiirillä ja pohditaan, kuinka monta lämpökaivoa tontille on mahdollista teoriassa toteuttaa.

Koulun tonttipinta-ala on suurehko rakennus pinta-alaan suhteutettuna. Tontilla on kuitenkin useampi alue, mitkä rajoittavat lämpökaivojen sijaintia. Lämpökaivojen sijaintia suunniteltaessa on nämä alueet otettava huomioon. Tämän lisäksi suunnittelussa on otettava huomioon Porin kaupungin rakennusmääräykset koskien maanalaista rakentamista

Lämpöpumpun tehon mitoitus

Maalämpöpumpun tehon mitoitus uudessa käyttökohteessa on toteutettu seuraavasti.

Rakennuksesta on laskettu/mallinnettu vuosittaiset lämpöhäviöt, jonka pohjalta mitoiteetaan lämmityslaitteen teho. Tästä tehosta katsotaan niin kutsuttu lämpöpumpun kattavuus, eli kuinka suuri osa tehosta tuotetaan maalämmöllä. Jotta maalämpö olisi kannattava, tulisi kattavuus olla yli 65 – 70% (Suomen Kalenterit Oy, 2019)

Olemassa olevan rakennuksen tapauksessa, lämpöpumpun kattavuus voidaan tässä tapauksessa katsoa suoraan olemassa olevan lämmitysjärjestelmän tehon perusteella. Mikäli kattavuudeksi valitaan 70 % ja Kalaholman koulun öljykattilalaitoksen tehon ollessa 160 kW, saadaan maalämpöpumpun mitoitustehoksi n. 100 kW.

Lämpökaivojen ominaisuudet

Lämpökaivojen osalta ja maalämpöpumpun tehon mitoituksessa, on tässä työssä oletettu omaavan seuraavat ominaisuudet:

Kaivon syvyydeksi on asetettu 155 m. Tyypillinen kaivosyvyys on 50 – 250 m (LVI-kalenteri 2019). 200 m on täten konservatiivinen arvio. (Suomen Kalenterit Oy, 2019)

Kaivon lietetilaksi asetetaan 5 m jotta kaivon syvyydeksi saadaan 150 m. Tämä on tyypillinen lukema maalämpökaivolle. Mitoitusarvoksi lämpö kaivon teholle, asetetaan 40 W/m. Tyypillisesti mitoitusarvo on 40-43 W/m välillä (Suomen Kalenterit Oy, 2019). Lämpökaivojen muita ominaisuuksia, kuten rakenteiden lämmönjohtavuutta, tai routimista ei ole tässä työssä otettu huomioon.

Maalämpökaivojen sijoitus

Porin kaupungin mukaan (2015) lämpökaivojen etäisyydet tulee olla seuraavaa:

Taulukko 5. Porin kaupungin määräykset lämpökaivojen etäisyyksistä (Porin Kaupunki, 2015)

Maalämpökaivojen vähimmäisetäisyydet	m
Naapurin rajasta	7,5
Katurajasta	4
Yleisestä alueesta	4
Toisesta lämpökaivosta	14
Rengaskaivosta	3
Rakennuksesta	3
Vesi ja viemärijohdosta	5

Lämpökaivoja sijoittaessa tontille on lähdetty ensiksi siitä, että vain Porin kaupungin asettamat määräykset täyttyvät, ottamatta kantaa, onko lämpökaivo järkevä, tai edes mahdollinen toteuttaa muista syistä. Lämpökaivoja pyritään sijoittamaan tontille mahdollisimman monta, lämmön tehontarpeen kattamiseksi.

Kalaholman koulun tonttirajat ovat selkeästi ilmastu, joten tässä suhteessa lämpökaivojen sijoitus on helppoa. Tonttia lähin katuraja ovat tontin koillispuolella oleva Lukkarisnantie. Muita katualueita tontin läheisyydessä ei ole.

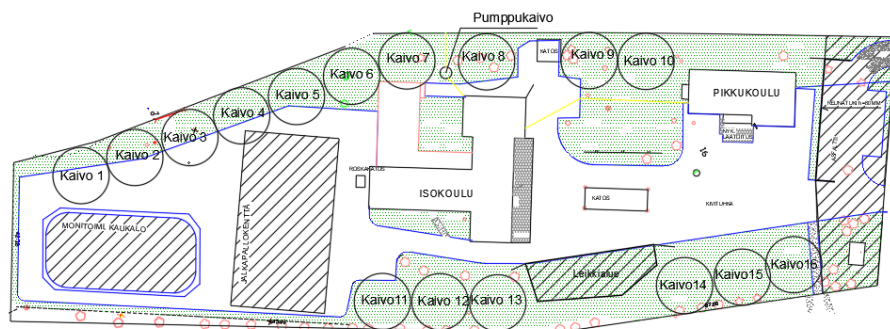
Tontilla olevien kahden koulurakennuksen lisäksi tontilta löytyy yksi avokatos, sekä roskakatos. Näille alueille, alle 3 m etäisyydelle kaivoja ei voi sijoittaa. Tontilla ei ole lainkaan rengaskaivoja.

Mitä tulee etäisyydestä yleiseen alueeseen, on määräys tulkinnanvarainen. Tällä tarkoitetaan sitä, että mikä mielletään yleiseksi alueeksi tässä tapauksessa. Jos yleiseksi alueeksi mielletään alue, missä on yleisesti ihmisiä tai muuta aktiviteettia, lämpö kaivojen sijoittaminen osoittautuu erittäin hankalaksi.

Mikäli edellä mainittu oletus tehdään. käytännössä katsoen, on sanottava, että koko koulutontti on oppilaiden käytössä, joten se voidaan kokonaan mieltää yleiseksi alueeksi, tehden lämpökaivojen sijoittamisesta käytännössä katsoen mahdotonta.

Tässä työssä on kuitenkin oletettu, että lämpökaivoja voidaan sijoittaa koulun alueelle, sillä varauksella, että ne eivät tule selkeästi rajatuille alueille, missä on yleistä toimintaa. Tämä tarkoittaa käytännössä katsoen piha-alueita, jääkiekkokaukaloa, jalkapallokenttää, leikkialueita sekä polkupyörä- ja polysäköintialuetta.

Noudattaen pelkästään Porin kaupungin rakennusmääräyksiä (2015) teoriassa on mahdollista porata 16 kaivoa. Kaivot ovat esitettynä alla olevassa kuvassa vaikutusalueiden kanssa piirrettynä:



Kuva 7. Maalämpökaivojen mahdolliset paikat koulun alueella.

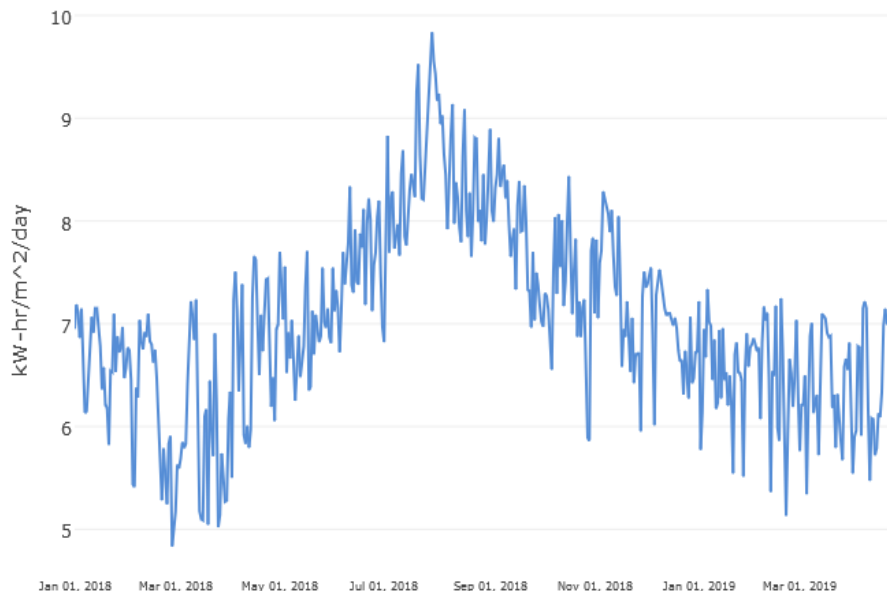
Vaikka rakennusmääräykset näiden lämpökaivojen osalta täyttyvät, ei ole syytä olettaa, että kyseisten kaivojen toteutus olisi täysin realistinen sellaisenaan.

Esimerkiksi lämpökaivot 1, 2, 3, 4 ja 5 ovat lähellä alueita, mihin kaivoja ei saisi laittaa, ja täten hankalassa paikassa. lämpökaivojen suunnittelussa tulisi välttää puiden tai muiden viheralueiden turmelemista kohtuuttomasti. Joten todennäköisesti osaa kaivoista ei voida porata kyseisille paikoille.

Ottaen huomioon edellä mainitut asiat, realistinen arvio on, että kouluun voidaan varmasti porata 11 lämpökaivoa.

5.2.3 Aurinkopaneelien mitoitus

Porin säteilymäärät vuonna 2018 on esitetty seuraavassa kuvassa:



Kuva 8. Säteilymäärä Porissa $kWh/m^2, d$ saatavilla: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Yllä olevasta kuvast voidaan nähdä, että suurin osa säteilymäärästä on kesällä kesäkuusta elokuulle. Tämä on koulun energiatuotannon kannalta kaikista epäotollisin aika, sillä potentiaalinen huippusähköntuotanto ajoittuu juuri koulun lomakauteen. Lisäksi kyseisenä aikana lämmöntarvetta ei ole käytännössä lainkaan.

Koska säteilymäärät ovat suhteellisen pieniä, tulisi aurinkopaneelin pinta-ala olla suhteellisen suuri, jotta ne tuottaisivat riittävästi sähköä tai lämpöä. Tontille ei aurinkopaneeleita pystytä käytännössä sijoittamaan maalämpöpumpun tapaan, kuin viheralueille, ja jos oletetaan, että kyseiset alueet on varattu maalämpökaivoille, ainoana vaihtoehtona aurinkopaneelien sijainnille on käytännössä katsoen koulurakennuksen katto.

Kalaholman koulun kattopinta-ala on n. 1100 m². Valitettavasti katto on vinokatto, jonka harjat ovat suhteellisen jyrkkiä ja osittain pohjoissuuntaan. Näin ollen aurinkopaneeleja ei ole kannattava sijoittaa koko kattopinta-alalle. Aurinkopaneeleja ei myöskään voida sijoittaa lähelle savupiippuja tai tuuletusaukkoja, jotta ne voidaan jatkossa nuohota.

Koulun kuvista ja MagiCAD Roomista mittaamalla, voidaan sanoa, että kattopinta-ala, mikä on suuntautunut etelään päin, on n. 150 m². Näin ollen 1 m² aurinkopaneeleja voidaan asentaa yhteensä 150 kpl. Aurinkopaneelit asetetaan tuottamaan pelkästään sähköä, ei lainkaan lämpöä, sillä nestepiirin rakentaminen katolle ei koeta kannattavaksi. Aurinkopaneelit asetetaan 45° kulmaan.

5.3 Koulurakennuksen mallin luominen

Kuten aikaisemmin todettiin, tässä työssä mallinnus toteutettiin käyttämällä MagiCAD-Room ohjelmistoa, sekä IDA-ICE ohjelmistoa. MagiCAD Room ohjelmistoa käytettiin ainoastaan rakennuksen mallin piirtämiseen. (Seinät, ikkunat ja ovet, välipohjat ja katto), sekä BIM-mallin luomiseen.

5.3.1 Koulurakennuksen luonti MagiCAD-Room-mallilla

Mallin piirtäminen MagiCAD-Room-ohjelmistolla toteutettiin seuraavasti. Projektia luodessa rakennukselle luotiin kerrokset. Ensimmäinen kerros asetettiin koordinaatiston origoon (0,0,0) ja toinen kerros asetettiin 3000 mm ylemmäksi (0,0,3000). Molempiin kerroksiin ladattiin pohjaksi (xref-tasolle) pohjapiirros kyseisestä kerroksesta.

Piirtäminen tapahtui pohjalla olleen mallin pohjalle siten, että ulkoseinätyypeiksi valittiin sopivan paksuinen ulkoseinä (exterior wall), ja sisäseinille vastaavasti sopivan paksuinen sisäseinä (interior wall). Myös kantavat seinät (structural wall) piirrettiin erikseen.

Seinämän korkeudeksi asetettiin koulun kerroskorkeus (2.7 m kellarikerroksessa ja 5.0 ensimmäisessä kerroksessa), ja malli piirrettiin pohjan päälle mahdollisimman tarkasti. Seinämien piirtämisen jälkeen, seinämät rajasivat rakennuksen sisälle tilat.

Rakennuksen tilat määriteltiin tässä vaiheessa mallinnusta ainoastaan siten, että ne nimettiin vastaamaan todellista tilannetta. Mitään muita parametrejä, kuten ilmamääriä tai mitoitustilapötilöjä ei tässä vaiheessa asetettu.

Syinä tähän on se, että joissakin tapauksissa MagiCAD Roomissa annetut parametrit huoneinen/tilojen osalta eivät aina siirry toiseen sovellukseen oikein. Toisin sanoen, tilojen tarkka määrittäminen saataisi johtaa siihen, että työtä tulisi tehtyä turhaan, mikäli IDA-ICE -ohjelmisto ei osaa lukea huoneiden tietoja oikein. Tilojen nimet löytyvät liitteistä A1 ja A2.

Kun seinät olivat paikallaan ja tilat olivat nimetty, malliin sijoitettiin ulko- ja väliovet tiloihin. Oviksi valittiin ulko-ovien tapauksessa 1000 mm leveät, ja väliovien tapauksessa 900 mm leveät ovet. Ovien parametrejä (U-arvoja) ei tässä vaiheessa määritetty.

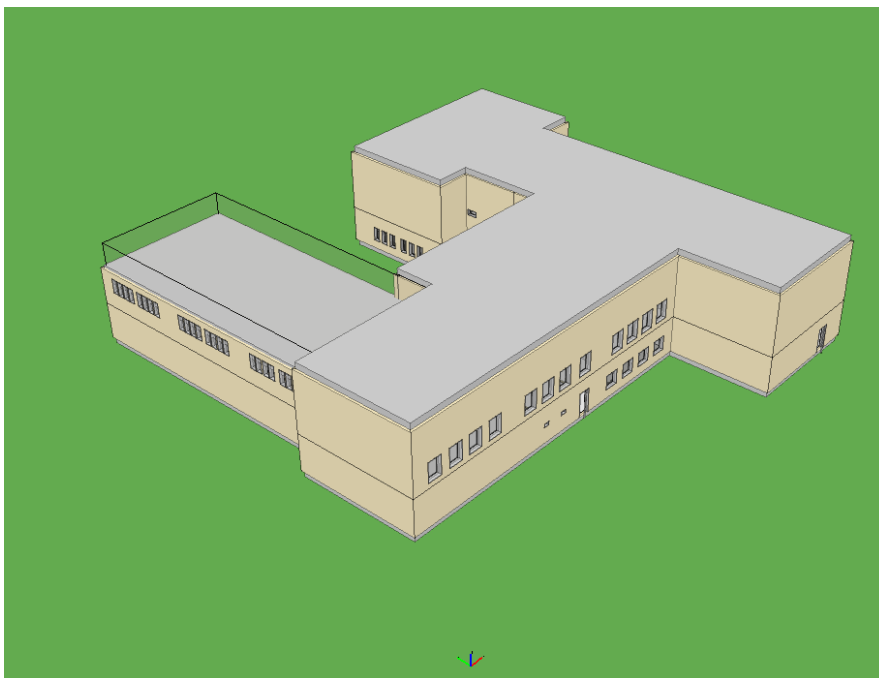
Ikkunat sijoitettiin malliin valokuvien perusteella ja arvioimalla. Tarkkoja ikkunamittoja ei rakennuksesta löytynyt, ja ikkunoiden mittaaminen paikan päällä arvioitiin olevan hyödyn/tarkkuuden kannalta merkityksetöntä. Ikkunatyyppejä luotiin 7 eri kappaletta, joista osa ikkuna ilmeni vain kertaalleen.

Kun malli oli luotu, tehtiin siitä BIM-tiedosto. Tässä vaiheessa ei tarkasteltu lämpöhäviöitä tai muita olosuhteita, mitä MagiCAD Room sovelluksella on mahdollista tarkastella. Nämä lukemat tarkasteltiin vasta IDA-ICE ohjelmistossa.

5.3.2 IDA-ICE ohjelmiston käyttö olosuhde- ja energiamallintamiseen

Ennen IDA-ICE analysointia, mallia ja analyyseja varten IDA-ICE-ohjelmistolla luotiin projekti, nimellä ”Kalaholman koulurakennus”. Projektia luodessa sijainniksi ja vuosisäädataa varten, valittiin sijainniksi Pori.

Projektin luonnin jälkeen ladattiin ohjelmistoon BIM-hakemistosta MagiCAD-Room ohjelmistolla luotu malli. IDA-ICE ohjelmistossa rakennus näyttää tältä:



Kuva 9. Kalaholman koulurakennus IDA-ICE sovelluksessa mallintamisen jälkeen.

Rakennusmalli ei täysin vastaa todellista rakennusta kaikilta osin. Tätä asiaa on käsitelty tämän työn luvussa: virheiden analysointi.

Ennen rakenneosien ja tilojen tarkempia määrittämiä, suunnattiin rakennus oikein. Suuntaus tapahtui Google Maps satelliittikuvien perusteella. Rakennuksen suuntaus saatiin sopivaksi, kun asteluvuksi asetettiin 315° .

Rakennuksen suuntauksen jälkeen ohjelmistolla luotiin vyöhykkeet tiloille. Koska tiloja ei ollut kohtuuttomasti, ja tilat olivat valmiiksi piirretty sekä määriteltä, asetettiin jokainen tila omaksi vyöhykkeeksi. Mikäli vyöhykkeitä olisi useita satoja, energiamallinnus IDA-ICE ohjelmistolla kestää useita tunteja.

Kun rakennuksen vyöhykkeet oli luotu, voitiin rakennetyypit määritellä nyt tarkemmin. Rakennuksen vyöhykkeet koostuivat pelkästään ikkunoista ja ovista, ulko- ja väliseinistä, ylä- ja alapohjista sekä maanpinnasta (ryömintätila).

Rakennuksen laajennusosan ulkoseinän U-arvoksi asetettiin $0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ sekä sisäseinän U-arvoksi $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$. Välipohjan U-arvoksi asetettiin $0.22 \text{ W/m}^2\text{K}$. Rakennusosien U-arvot saatiin suoraan laajennusosan suunnitelmien yhteydessä tehdyistä Rakennesuunnitelmista.

Ovien ja ikkunoiden U-arvoksi asetettiin $2.1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ovien ja ikkunoiden U-arvoja ei rakennetyypeissä löytynyt, joten arvoiksi asetettiin tuolloin (2002) voimassa olleiden rakennusmääräysten (C3-1987) mukaiset U-arvot.

Alkuperäisen rakennuksen (1937 valmistuneen) osalta U-arvojen valitseminen oli hankalampaa. Koska rakennus on vanha, ja nykyaikaisia rakennusmääräyksiä ei ollut saatavilla, ovien ja ikkunoiden U-arvot arvioitiin seuraavalla periaatteella:

Aikaisin maininta ovien U-arvon maksimiarvosta on vuodelta 1978 (40 vuotta rakennuksen rakennusvuoden jälkeen), ja tässäkin tapauksessa maininta on ainoastaan oven umpiosasta, ei koko ovesta. Koska aikaisempaa tietoa ei ollut saatavilla, arvioitiin ovien U-arvoksi $2,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, sama kuin laajennusosan ovilla.

Ikkunoiden U-arvosta ei ovien tapaan löytynyt tarkkoja tietoja, joten arvona käytettiin $3.14 \text{ W/m}^2\text{K}$. Todennäköisesti arvo on keskimäärin mahdollisesti korkeampi tai jopa matalampi. On syytä olettaa, että ainakaan kaikki Kalaholman koulun ikkunat eivät ole alkuperäisiä. Koulu on muun muassa joutunut useaan otteeseen ilkivallan kohteeksi, missä ikkunoita koulussa on rikottu, jonka seurauksena niitä on todennäköisesti myös vaihdettu. (Radio Pori, 2017)

Ikkunoiden ja ovien U-arvojen asettelun jälkeen, Määriteltiin rakennuksen tilojen parametrit kappaleen edellä mainittujen mitoitusparametrien perusteella, riippuen siitä, mikä tila on kyseessä. Eri tilojen ja rakenteiden mitoitus tiedot tarkistettiin IDA-ICE ohjelmistossa ennen kuin tehtiin ajoja energiankulutukselle.

6 Ratkaisuvaihtoehtojen analysointi

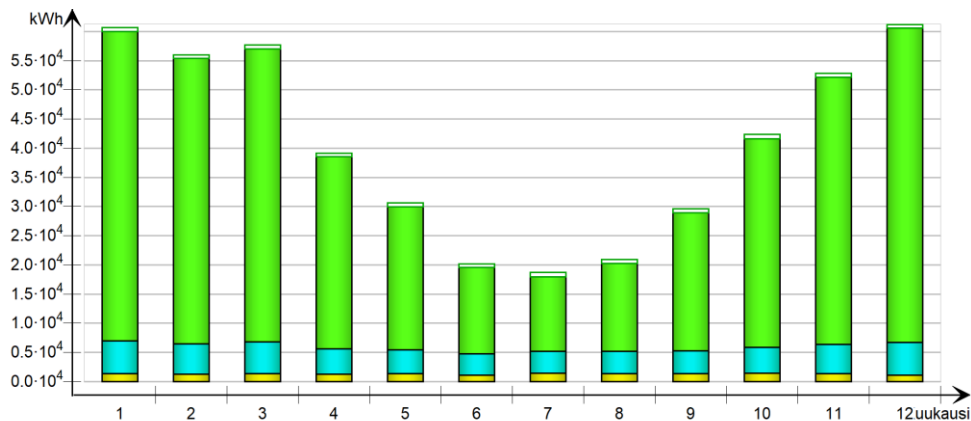
Seuraavassa käsitellään tapauskohtaisen simuloinnin tuloksia, sekä jatkojalostetaan saatuja arvoja, kuten eri järjestelmien energiansäästö määrää sekä päästöjen vähennyksiä. Tämän lisäksi kouluun hankittavasta ilmavesilämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmästä tehdään investoinnin kannattavuuslaskelmat takaisinmaksu- sekä nykyarvomenetelmällä. Järjestelmien vuosittaista säästöä energiakustannuksissa on vertailtu aina edelliseen järjestelmään sekä öljylämmitys järjestelmään.

6.1 Öljylämmitysjärjestelmä

Vaikka Kalaholman koulu on olemassa oleva rakennus, ja kaikki huolto, investointi ja polttoainekustannukset olisivat saatavilla, on käytännöllisempää mallintaa järjestelmä IDA-ICE ohjelmistolla. Näin voidaan vertailla järjestelmien eroja suoraan tuloksista, ja myös tarkistaa, antavatko kappaleessa neljä asetetut parametrit tarpeeksi realistisen tuloksen.

Öljylämmitysjärjestelmän käytöstä aiheutuvat määrät kuukausittaiselle kokonaisenergialle on esitetty kuvassa 10.

Kuukausittainen kokonaisenergia



Kuukausi	Kiinteistösähkö				Kiinteistö polttoaine (Lämpöarvo)		Asukkaan sähkö		Tuotettu sähkö	
	Valaistus, kiinteistö		LVI sähkö		Fossiilinen polttoaine		Laitteet, asukas		CHP tuotto	
	(kWh)	Kokonaisenergia (kWh)	(kWh)	Kokonaisenergia (kWh)	(kWh)	Kokonaisenergia (kWh)	(kWh)	Kokonaisenergia (kWh)	(kWh)	Kokonaisenergia (kWh)
1	1163.0	1395.6	4651.0	5581.2	53031.0	53031.0	581.6	697.9	0.0	0.0
2	1057.0	1268.4	4359.0	5230.8	48967.0	48967.0	528.7	634.4	0.0	0.0
3	1111.0	1333.2	4548.0	5457.6	50227.0	50227.0	555.6	666.7	0.0	0.0
4	1058.0	1269.6	3617.0	4340.4	32969.0	32969.0	529.3	635.2	0.0	0.0
5	1110.0	1332.0	3369.0	4042.8	24530.0	24530.0	555.2	666.2	0.0	0.0
6	951.1	1141.3	3064.0	3676.8	14838.0	14838.0	475.5	570.6	0.0	0.0
7	1215.0	1458.0	3123.0	3747.6	12772.0	12772.0	607.4	728.9	0.0	0.0
8	1163.0	1395.6	3175.0	3810.0	15074.0	15074.0	581.3	697.6	0.0	0.0
9	1111.0	1333.2	3249.0	3898.8	23680.0	23680.0	555.5	666.6	0.0	0.0
10	1218.0	1461.6	3722.0	4466.4	35732.0	35732.0	608.9	730.7	0.0	0.0
11	1111.0	1333.2	4197.0	5036.4	45800.0	45800.0	555.5	666.6	0.0	0.0
12	951.3	1141.6	4713.0	5655.6	53902.0	53902.0	475.7	570.8	0.0	0.0
Yhteensä	13219.4	15863.3	45787.0	54944.4	411522.0	411522.0	6610.2	7932.2	0.0	0.0

Kuva 10. Öljylämmitysjärjestelmän käytön kokonaisenergia

Kuvan pylväsdiagrammissa vihreä pylväs on fossiilisten polttoaineiden osuus kokonaisenergiasta (kWh), ja sininen osuus on sähkön osuus (laitteisto, ilmanvaihtokoneet sekä muut sähköjärjestelmät, pois lukien valaistus). Keltainen osuus kuvaa valaistuksen osuutta kokonaisenergiasta.

Ensisilmäyksellä laskentatulokset vaikuttavat järkeviltä. Talvikuukausina (marraskuu – maaliskuu) öljyn ja energian kulutus on suurinta. Suurin kulutuskuukausi on joulukuu. Kesäkuukausina (kun koulu on suljettu) kulutus putoaa n. kolmannekseen huippukulutuksesta. Heinäkuussa kulutus on kaikista pienintä, mikä kuulostaa myös järkevältä.

Kuten tuloksista nähdään, koulurakennuksen kokonaisenergiankulutus vuoden aikana on yhteensä kiinteän fossiilisen polttoaineen (öljyn) kokonaisostoenergia vuoden aikana on 411522.0 kWh, tai 115,49 tn CO₂. Kyseinen energiamäärä jaettuna kevyen polttoöljyn tehoarvolla (10 kWh/l) ja kattilan hyötysuhteella (0,9), saadaan ostetun öljyn määräksi litroina n. 45700 l.

Mallituksen pohjalta saadun öljynkulutuksen perusteella voimme arvioida, että mallituksen vertailukohta on erittäin lähellä todellisuutta. Kuten kappaleessa 2.3 todettiin, koulun mitattu todellinen öljynkulutus on n 44000 l. Tähän on laskettu mukaan pikku-koulun n. 5 % öljynkulutus (2200 l), joten mallinnuksessa laskettu öljyn kulutus vastaa todellista tilannetta jopa 98,5 % tarkkuudella.

Koska mallituksen perusteella laskettu öljynkulutus on hyvin lähellä todellista öljynkulutusta, voimme pitää vertailukohtaa hyvin tarkkana ja pätevänä lähtökohtana muille mallinuksille. Voimme siis olettaa, että alkuarvoja ja mitoitusparametrejä ei ennen uusia simulointeja ole syytä muuttaa.

Kokonaissähkönkulutus (62880 kWh) mallissa vastasi todellista vuosikulutusta (55 000 kWh) melko tarkasti, mutta ei niin tarkasti kuin öljynkulutuksen osalta.

Kokonaiskulutukselle saadaan taulukon 6 mukaiset arvot.

Taulukko 6. Öljylämmitysjärjestelmän ostoenergiankulutusraportti

	Käytetty energia		Ostoenergia		Tarve	Kokonaisenergia	
	kWh	kWh/m ²	kWh	kWh/m ²	kW	kWh	kWh/m ²
Vaistutus, kiinteistö	13219	7.2	13219	7.2	6.61	15863	8.6
LVI sähkö	45787	25.0	45787	25.0	7.74	54944	29.9
Yhteensä, Kiinteistösähkö	59006	32.2	59006	32.2		70807	38.6
Fossiilinen polttoaine	411522	224.3	411522	224.3	154.3	411522	224.3
Yhteensä, Kiinteistö polttoaine*	411522	224.3	411522	224.3		411522	224.3
Yhteensä	470528	256.5	470528	256.5		482329	262.9
Laitteet, asukas	6610	3.6	6610	3.6	3.3	7932	4.3
Yhteensä, Asukkaan sähkö	6610	3.6	6610	3.6		7932	4.3
	Tuotettu energia		Myyty energia		Tuotettu		
CHP tuotto	0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0
Yhteensä, Tuotettu sähkö	0	0.0	0	0.0		0	0.0
Yhteensä	477138	260.1	477138	260.1		490261	267.2

Kuten taulukosta 6 nähdään, kiinteistön lämmitykseen kuluva energia on ylivoimaisesti suurin menoerä energialaskussa. Kokonaiskulutus koko rakennukselle vuodessa on n. 477138 kWh.

6.1.1 Öljylämmityksen kustannukset

Kattilalaitoksen kustannuksia arvioidessa voidaan ne jakaa kolmeen osaan, investointi-kustannukseen, polttoainekustannukseen ja huolto/korjauskustannukseen. Päästöjen aiheuttamat kustannukset jätetään tarkastelussa huomiotta.

Investointikustannukset

Koulun kattilalaitos on vuodelta 1997. Koska kattilalaitoksen ostohetkestä on jo yli 20 vuotta, voidaan arvioida, että koulun kunnalta saama rahoitus 20. vuoden ajalta on kattanut jo kattilalaitoksen hankintakustannukset. Näin ollen alkuperäinen investointi on jo maksettu.

Kattilalaitos on mahdollisesti kuitenkin uusittava tulevaisuudessa. Öljykattilan käyttöikä on tyypillisesti 25 – 35 vuotta (Neste Oil, 2019). Mikäli oletetaan keskimääräinen kattila, sen toiminta ajaksi voidaan arvioida 30 vuotta. Tämä tarkoittaisi sitä, että kattilalaitos tulisi uusita n. 10 vuoden päästä vuonna 2028.

Koska kattilalaitos tulisi vaihtaa teoriassa, vuonna 2028 kaksi vuotta ennen hiilineutraalia Poria, voidaan olettaa, että kattilalaitosta ei tulla enää uusimaan, vaikka koulua ei päätetäkään purkaa. Näin ollen kattilalaitoksen teoreettista käyttöikää pidennetään 32 vuoteen ja oletetaan, että uutta kattilalaitosinvestointia ei tarvitse tehdä. Tämä on vielä tyypillisen öljykattilan käyttöiän haarukassa, joten oletus on turvallista tehdä.

Polttoaine- ja energiakustannukset

Polttoainekustannusten arvioinnissa on käytetty käytetyn polttoaineen määränä lähtötiedoista saatua todellista vuosikulutusta, eli noin. 44000 l öljyä vuodessa. 44000 l öljyä vuodessa vastaa tämän hetkiselä (2019) öljyn hinnalla, n 44 000 € vuodessa (Neste, 2019). Hintaan on laskettu mukaan mahdolliset kuljetuskustannukset, sekä öljysäiliön täyttö.

Koska polttoaineen hintakehitystä on hankala arvioida, oletetaan yksinkertaisuuden vuoksi, että polttoaineen hinta pysyy samana seuraavina vuosina. Oletus on tehty seuraavien päätelmien pohjalta:

Polttoaineen kysynnän oletetaan laskevan uusiutuvia energioita hyödyntävien järjestelmän syrjäyttäessä vanhat lämmitysjärjestelmät. Samalla kuitenkin polttoaineen, ja erityisesti öljyn saatavuus maailmassa vähenee merkittävästi vuoteen 2030 mennessä. Tämä osaltaan voisi nostaa polttoaineen hintaa. Koska hintaa on hankala arvioida kymmeneksi vuodeksi eteenpäin, oletetaan, että nämä kaksi ilmiötä tasoittavat polttoaineen hinnan keskimäärin samaksi vuodesta toiseen.

Koska kyseessä on koulurakennus, joissa on tyypillisesti vuodesta toiseen lähtökohtaisesti samat työskentelyolosuhteet ja käyttötarkoitus ei juurikaan muutu, voidaan koulurakennusta pitää seuraavina vuosina rakenteeltaan ja käyttöasteeltaan muuttumattomana-

Tämän seurauksena voidaan olettaa, että rakennuksen energiankulutus ei tule juurikaan kasvamaan seuraavina vuosina. Energiankulutus voi kuitenkin mahdollisesti pienentyä, mikäli kouluun esimerkiksi asennettaisiin energiatehokkaammat valaisimet, tai ilmanvaihtokoneet uusittaisiin. Vastaavia toimenpiteitä ei kuitenkaan tässä työssä oleteta olevan edessä.

Sähkönkulutus yhteensä koko koulussa oli siis n. 62880 kWh. Myös sähkönkulutuksen on aikaisemmassa kappaleessa mainittujen asioiden pohjalta säilyvän samana vuodesta toiseen. Sähkön hinnaksi on arvioitu tässä työssä 0,15 €/kWh. Tämä sisältää sähköenergian ja siirtomaksun. Näin ollen sähkön ostohinnaksi tulee $62880 \text{ kWh} * 0,15 \text{ €/kWh} =$

9432 €/vuodessa. Yhteensä energiakustannukset öljylämmitysjärjestelmällä on 53432 €/vuodessa.

Huoltokustannukset

Kattilalaitoksen huoltaminen on luvanvaraista toimintaa. Öljylämmittimen poltin tulisi huoltaa kahden vuoden välein. Tämän lisäksi öljysuodatin tulisi vaihtaa, joka toinen vuosi. Kattilalaitoksen piippu tulisi myös nuohota vähintään kerran vuodessa. (Neste Oil, 2019)

Huoltotoimenpiteet ja niiden hinta vaihtelevat huomattavasti. Osa huoltotoimista maksavat alle 200 € mutta suuremmat voivat maksaa jopa 500 €. Myös huoltoliikkeiden välillä on eroja hinnoissa. Selkeyden vuoksi, tässä työssä oletetaan, että kattilalaitoksen huoltotoimenpiteet maksavat keskimäärin 500 € vuodessa.

Sähkölaitteiden osalta on oletettu, että huoltotoimenpiteet eivät ole kustannukseltaan merkittäviä elinkaarianalyysissä. Koska kyseiset summat tulisivat olemaan keskimäärin vuodesta toiseen, lämmitysjärjestelmästä riippumatta samat, ei niitä sisällytetä elinkaarianalyysiin.

6.1.2 Öljylämmityksen ympäristövaikutukset

Aikaisemmin laskettu tuotettu hiilidioksidin määrä vuodessa on n. 93 tn. Kuten investointikustannusten tapauksessa, määrä tulee pysymään lähes samana seuraavina vuosina, mikäli öljylämmitys on nykyisellään käytössä jatkossakin. Tämä vastaa 11 vuoden ajalta (vuoteen 2030 mennessä) yhteensä n. 1018 tn hiilidioksidia.

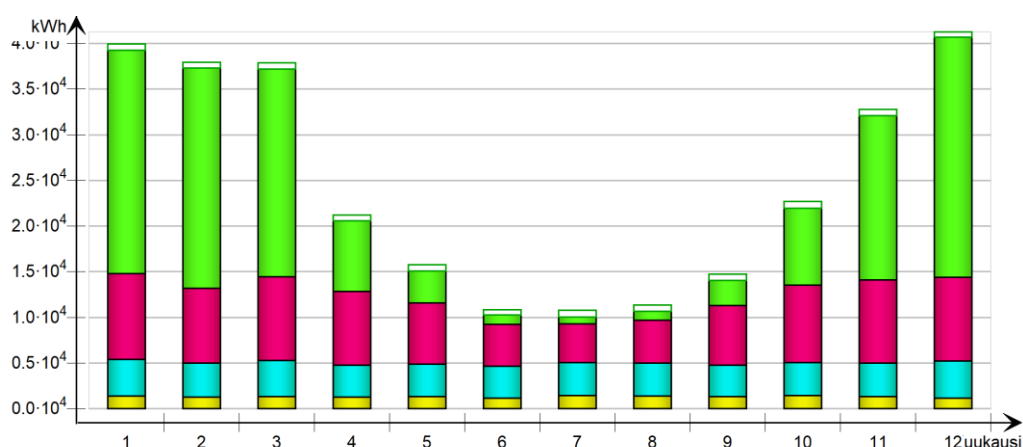
Hiilidioksidipäästöissä ei ole laskettu mukaan öljynkuljetusauton käyttämää polttoainetta, eikä kattilalaitoksen valmistamiseen ja huoltoon vaadittavien materiaalien sitomaa hiilidioksidia. Oletuksena on, että tämä määrä on pieni verrattuna päästömääriin.

On sanomattakin selvää, että pelkän öljylämmityksen tapauksessa, edes tilanteessa missä järjestelmä uusitaan, ei lämmitysenergian käytöstä aiheutuvia ympäristöhaittoja pystytä juurikaan vähentämään. Samalla on myös selvää, että miltei mikä tahansa uusiutuvaa energiaa hyödyntävä järjestelmä, minkä avulla öljyn kulutusta pystytään vähentämään, vähentäisi samalla negatiivisia ympäristövaikutuksia.

6.2 Ilmalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmä

Koulurakennuksen parametreilla ja ilmavesilämpöpumppu -hybridijärjestelmällä osto ja kulutusenergialle saadaan seuraavat arvot.

Kuukausittainen kokonaisenergia



Kuukausi	Kiinteistösähkö						Kiinteistö polttoaine (Lämpöarvo)		Asukkaan sähkö		Tuotettu sähkö	
	Valaistus, kiinteistö		LVI sähkö		Sähkölämmitys, kiinteistö		Fossiilinen polttoaine		Laitteet, asukas		CHP tuotto	
	(kWh)	Kokonaisenergia (kWh)	(kWh)	Kokonaisenergia (kWh)	(kWh)	Kokonaisenergia (kWh)	(kWh)	Kokonaisenergia (kWh)	(kWh)	Kokonaisenergia (kWh)	(kWh)	Kokonaisenergia (kWh)
1	1164.0	1396.8	3321.0	3985.2	7822.0	9386.4	24475.0	24475.0	581.9	698.3	0.0	0.0
2	1058.0	1269.6	3117.0	3740.4	6836.0	8203.2	24106.0	24106.0	528.9	634.7	0.0	0.0
3	1110.0	1332.0	3295.0	3954.0	7636.0	9163.2	22734.0	22734.0	555.1	666.1	0.0	0.0
4	1057.0	1268.4	2907.0	3488.4	6749.0	8098.8	7737.0	7737.0	528.5	634.2	0.0	0.0
5	1111.0	1333.2	2979.0	3574.8	5584.0	6700.8	3511.0	3511.0	555.5	666.6	0.0	0.0
6	950.6	1140.7	2895.0	3474.0	3843.0	4611.6	1051.0	1051.0	475.3	570.4	0.0	0.0
7	1214.0	1456.8	3005.0	3606.0	3552.0	4262.4	738.4	738.4	606.9	728.3	0.0	0.0
8	1163.0	1395.6	3006.0	3607.2	3917.0	4700.4	997.2	997.2	581.5	697.8	0.0	0.0
9	1110.0	1332.0	2889.0	3466.8	5453.0	6543.6	2779.0	2779.0	555.1	666.1	0.0	0.0
10	1217.0	1460.4	3009.0	3610.8	7072.0	8486.4	8453.0	8453.0	608.4	730.1	0.0	0.0
11	1111.0	1333.2	3078.0	3693.6	7580.0	9096.0	18016.0	18016.0	555.4	666.5	0.0	0.0
12	951.6	1141.9	3404.0	4084.8	7658.0	9189.6	26280.0	26280.0	475.8	571.0	0.0	0.0
Yhteensä	13217.2	15860.6	36905.0	44286.0	73702.0	88442.4	140877.6	140877.6	6608.3	7930.0	0.0	0.0

Kuva 11. Ilmavesilämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmän vuosittainen energiankulutus.

Yllä olevassa kuvassa vihreä pylväs on polttoaineen (öljyn) osuus, punainen pylväs on ilmalämpöpumpun kuluttaman sähkön osuus, sininen pylväs on muiden LVI-laitteiden osuus ja keltainen pylväs on valaistuksen osuus.

Kuten ylläolevasta kuvasta nähdään, koulun kokonaisenergiankulutus putoaa kyseisellä hybridijärjestelmällä lähes puoleen verrattuna pelkällä öljyjärjestelmällä tarvittavaan ostoenergiaan. Tämän lisäksi öljyn ostoenergia putoaa lähes kolmannekseen alkuperäisestä tilanteesta.

Ilmavesilämpöpumpun osuus energiantuotannosta on suurinta kesällä ja pienintä talvi-kuukausina. Vastaavasti käänteisesti öljynkulutus on suurinta talvella ja kesällä pientä. Järjestelmän vuosittaisen ostoenergian tarve on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Ilmavesilämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmän vuosittainen ostoenergiankulutusraportti.

	Käytetty energia		Ostoenergia		Tarve	Kokonaisenergia	
	kWh	kWh/m ²	kWh	kWh/m ²	kW	kWh	kWh/m ²
Valaistus, kiinteistö	13217	7.2	13217	7.2	6.61	15861	8.6
LVI sähkö	36905	20.1	36905	20.1	5.91	44286	24.1
Sähkölämmitys, kiinteistö	73702	40.2	73702	40.2	17.35	88442	48.2
Yhteensä, Kiinteistösähkö	123824	67.5	123824	67.5		148589	81.0
Fossiilinen polttoaine	140878	76.8	140878	76.8	119.0	140878	76.8
Yhteensä, Kiinteistö polttoaine*	140878	76.8	140878	76.8		140878	76.8
Yhteensä	264702	144.3	264702	144.3		289467	157.8
Laitteet, asukas	6608	3.6	6608	3.6	3.3	7930	4.3
Yhteensä, Asukkaan sähkö	6608	3.6	6608	3.6		7930	4.3
	Tuotettu energia		Myyty energia		Tuotettu		
CHP tuotto	0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0
Yhteensä, Tuotettu sähkö	0	0.0	0	0.0		0	0.0
Yhteensä	271310	147.9	271310	147.9		297397	162.1

Kuten taulukosta nähdään, myös koulun ostoenergian tarve putoaa kyseisellä hybridijärjestelmällä lähes puoleen verrattuna pelkällä öljyjärjestelmällä tarvittavaan ostoenergi-
aan. Tämän lisäksi öljyn ostoenergia putoaa lähes kolmannekseen alkuperäisestä tilan-
teesta.

6.2.1 Ilmavesilämpöpumppu -kattilahybridijärjestelmän kustannuk- set

Hybridi ilmavesilämpöpumppu-öljykattilajärjestelmän kustannukset jaetaan samoin, ku-
ten öljykattilajärjestelmän tapauksessa; investointi-, polttoaine- sekä huoltokustannuk-
siin.

Investointikustannukset

Ilmavesilämpöpumpun kiinteiksi kustannuksiksi on ilmoitettu laitetoimittajan toimesta
seuraavaa:

Taulukko 8. Ilmavesilämpöpumpun kiinteät kustannukset

Investointi	€, alv 0%
Ilmavesilämpöpumppu ja varaaja	31 000
Putkistot, venttiilit, asennustyöt	10 000
Yhteensä	41 000

Polttoaine- ja energiakustannukset

Ilmavesi-lämpöpumpun asennuksen jälkeen tarvittava vuosittainen öljyn ostotarve litroissa (Hyötysuhde 0,9), on n. 15 653 l. Euroissa vastaava litramäärä vastaa n. 15 653 €. Polttoainekulut pienennevät miltei kolmannekseen alkuperäisestä tilanteesta.

Yhteensä sähköenergian ostotarve on n. 130 432 kWh (kiinteistösähkö + laitteet) tai 19 564,8 € (sähkön hinta 0,15 €), mikä on yli tuplasti verrattuna pelkällä öljylämmityksellä ostetun sähkön määrään. Ilmavesilämpöpumppu- kattilahybridilämmitysjärjestelmän yhteensä lasketut energiakustannukset vuosittain (ilman ennakoitua sähkönhinnan korotusta) ovat 35217,8 €. Säästö energiakustannuksissa verrattuna pelkkään öljylämmitysjärjestelmään on $53432 \text{ €} - 35217,8 \text{ €} = 18214,2 \text{ €/vuosi}$. Laskuissa ei ole otettu huomioon säästön diskonttausta tai sähköenergian eskaloitumista. Ne ovat kuitenkin huomioitu kannattavuuslaskelmissa kappaleessa 5.4

Kuten pelkän öljylämmityksen tapauksessa, voidaan olettaa, että kyseiset sähkön ja polttoaineen ostotarve eivät tule juuri muuttumaan seuraavina vuosina. Joten vuosittainen säästö on vuodesta toiseen sama.

Huoltokustannukset

Huoltokustannukset hybridi ilmavesilämpöpumppu ja öljykattilajärjestelmällä tulvat koostumaan molempien erillisjärjestelmien huoltokustannuksista. Koska öljykustannukset ovat kiinteitä ja käyttöasteesta riippumattomia, tulevat ne pysymään ennallaan (500 € vuodessa).

Ilmalämpöpumpun huoltoon kuuluu muun muassa suodattimien vaihto, sekä järjestelmän diagnostiikan tarkistaminen. Myös venttiililiitokset, sekä pumppujen toiminta tulisi tarkistaa vuosittain. Selkeyden vuoksi oletetaan, että huoltokustannukset ilmalämpöpumpun ovat öljylämmitysjärjestelmän kanssa samat, eli 500 € vuodessa.

6.2.2 Ilmavesi-öljyhybridilämmityksen ympäristövaikutukset

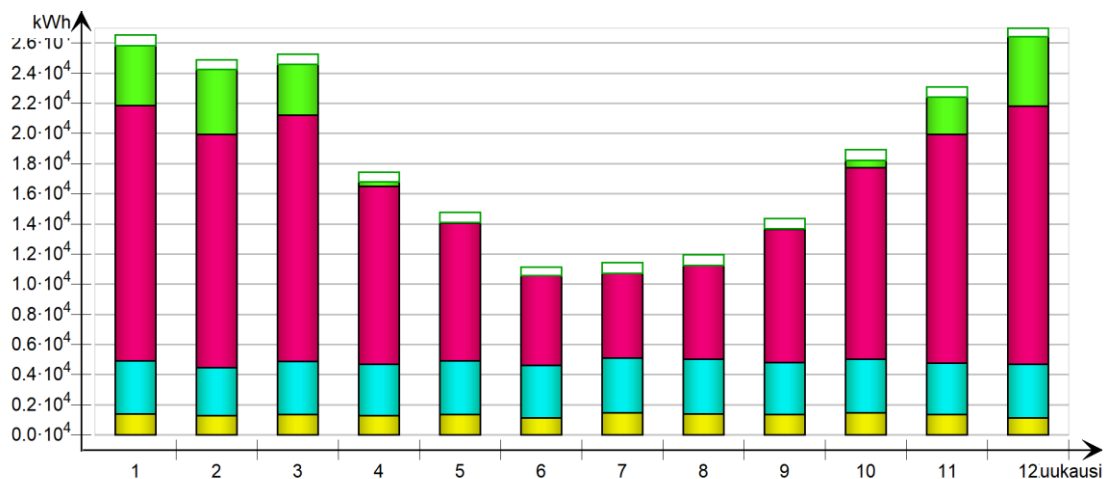
Ilmavesi-lämpöpumpun käytössä ei käytännössä synny ympäristöpäästöjä, muuten kuin melun muodossa, mikäli ilmalämpöpumpun sähkö tuotetaan uusiutuvalla energialla. Päästöt lämmitysjärjestelmästä syntyy siis pelkästään öljylämmityksen osalta.

Hybridijärjestelmän vuosittainen öljyn kulutus 15653 l vastaa n. 32,9 tn hiilidioksidia, jos käytetään samoja kertoimia, kuin luvussa 2.3.3. Tämä on noin kolmannes pelkän öljylämmitysjärjestelmän öljynkulutuksesta. Vuoteen 2030 mennessä, päästöt tulevat olemaan yhteensä n. 362 tn. Päästövähennys pelkkään öljylämmitysjärjestelmään on n. $1018 \text{ tn} - 362 \text{ tn} = 656 \text{ tn}$ tai n. 65 %.

6.3 Maalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmä

Maalämpöpumppu öljykattilajärjestelmälle saadaan seuraavat lukemat energiankulutukselle:

Kuukausittainen kokonaisenergia



Kuukausi	Kiinteistösähkö						Kiinteistö polttoaine (Lämpöarvo)		Asukkaan sähkö		Tuotettu sähkö	
	Valaistus, kiinteistö		LVI sähkö		Sähkölämmitys, kiinteistö		Fossiilinen polttoaine		Laitteet, asukas		CHP tuotto	
	(kWh)	Kokonaisenergia (kWh)	(kWh)	Kokonaisenergia (kWh)	(kWh)	Kokonaisenergia (kWh)	(kWh)	Kokonaisenergia (kWh)	(kWh)	Kokonaisenergia (kWh)	(kWh)	Kokonaisenergia (kWh)
1	1164.0	1396.8	2947.0	3536.4	14126.0	16951.2	3984.0	3984.0	581.9	698.3	0.0	0.0
2	1059.0	1270.8	2667.0	3200.4	12910.0	15492.0	4315.0	4315.0	529.4	635.3	0.0	0.0
3	1110.0	1332.0	2941.0	3529.2	13622.0	16346.4	3370.0	3370.0	555.2	666.2	0.0	0.0
4	1057.0	1268.4	2857.0	3428.4	9839.0	11806.8	306.8	306.8	528.7	634.4	0.0	0.0
5	1109.0	1330.8	2967.0	3560.4	7620.0	9144.0	31.9	31.9	554.7	665.6	0.0	0.0
6	950.6	1140.7	2901.0	3481.2	4971.0	5965.2	1.7	1.7	475.3	570.4	0.0	0.0
7	1214.0	1456.8	3022.0	3626.4	4695.0	5634.0	0.7	0.7	607.2	728.6	0.0	0.0
8	1162.0	1394.4	3025.0	3630.0	5197.0	6236.4	3.9	3.9	580.8	697.0	0.0	0.0
9	1109.0	1330.8	2884.0	3460.8	7369.0	8842.8	30.5	30.5	554.6	665.5	0.0	0.0
10	1216.0	1459.2	2956.0	3547.2	10595.0	12714.0	493.4	493.4	608.1	729.7	0.0	0.0
11	1110.0	1332.0	2851.0	3421.2	12653.0	15183.6	2479.0	2479.0	555.2	666.2	0.0	0.0
12	951.5	1141.8	2953.0	3543.6	14264.0	17116.8	4617.0	4617.0	475.8	571.0	0.0	0.0
Yhteensä	13212.1	15854.5	34971.0	41965.2	117861.0	141433.2	19633.9	19633.9	6606.9	7928.3	0.0	0.0

Kuva 12. Maalämpö-kattilahybridijärjestelmän vuosittainen energiankulutus

Kuvassa vihreä pylväs on polttoaineen (öljyn osuus), punainen pylväs on maalämpöpumpun kuluttaman sähkön osuus, sininen pylväs on muiden LVI-laitteiden osuus ja keltainen pylväs on valaistuksen osuus. Kuvasta voidaan nähdä, että kokonaisenergiankulutus putoa vielä enemmän, kuin ilmavesilämpöpumpun tapauksessa, erityisesti talvikuukausina.

Kesäkuukausina öljynkulutus putosi lähestulkoon nollaan. Sen sijaan sähkönkulutuksen osuus kesäkuukausina nousi verrattuna ilmavesilämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmään.

Taulukko 9 Maalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmän vuosittainen ostoenergiankulutus raportti.

	Käytetty energia		Ostoenergia		Tarve Kokonaisenergia		
	kWh	kWh/m ²	kWh	kWh/m ²	kW	kWh	kWh/m ²
Valaistus, kiinteistö	13212	7.2	13212	7.2	6.61	15855	8.6
LVI sähkö	34971	19.1	34971	19.1	5.6	41965	22.9
Sähkölämmitys, kiinteistö	117861	64.2	117861	64.2	28.05	141433	77.1
Yhteensä, Kiinteistösähkö	166044	90.5	166044	90.5		199253	108.6
Fossiilinen polttoaine	19634	10.7	19634	10.7	40.85	19634	10.7
Yhteensä, Kiinteistö polttoaine*	19634	10.7	19634	10.7		19634	10.7
Yhteensä	185678	101.2	185678	101.2		218887	119.3
Laitteet, asukas	6607	3.6	6607	3.6	3.3	7928	4.3
Yhteensä, Asukkaan sähkö	6607	3.6	6607	3.6		7928	4.3
		Tuotettu energia	Myyty energia		Tuotettu		
CHP tuotto	0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0
Yhteensä, Tuotettu sähkö	0	0.0	0	0.0		0	0.0
Yhteensä	192285	104.8	192285	104.8		226815	123.6

Kuten taulukosta 9 nähdään, polttoainekustannukset putosivat merkittävästi verrattuna ilmavesilämpöpumppua käyttävään järjestelmään, ja lähestulkoon romahtivat verrattuna pelkkään öljylämmitysjärjestelmään. Sähkön ostoenergian määrä kuitenkin lisääntyi, verrattuna pelkkään öljylämmitykseen, sekä ilmavesilämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmään.

6.3.1 Maalämpöpumppu-kattilahybridijärjestelmän kustannukset

Koska maalämpöpumpun asennusta ja mahdollisia säästöjä on tarkoitus arvioida ainoastaan teoreettisesti, ei investointi- asennus tai huoltokustannuksia oteta arviossa huomioon.

Polttoaine- ja energiakustannukset

Osto öljyn määrä maalämpöpumpun asennuksen jälkeen on n. 19634 kWh tai noin 1963 €, Tämä on vain n. 4,5 % tilanteessa, missä koko lämmitys toteutetaan öljylämmityksellä. Ero ilmavesilämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmään on noin 13690 €.

Yhteensä sähköenergian ostomäärä lämpöpumpun asennuksen jälkeen on noin 172 651 kWh tai 25898 € (sähkön hinta 0.15 kWh/€), tämä on noin 6332,85 € enemmän, kuin ilmalämpöpumpun tapauksessa ja n. 16465.65 € enemmän kuin pelkän öljykattilan tapauksessa.

Energian kokonaiskustannukset vuosittain maalämpöpumpun tapauksessa ovat n. 25898 € + 1963 € = 27860,65 € ja kokonaissäästö verrattuna öljykattilajärjestelmään 53432 € - 27860.65 € = 25571,35 €. Tämä on 7357,15 € enemmän säästöä vuosittain, kuin ilmavesilämpöpumpun tapauksessa.

6.3.2 Maalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmän ympäristövaikutukset

Kuten ilmavesilämpöpumpun tapauksessa, maalämpöpumpun käytöstä ei aiheudu ympäristöpäästöjä, jos työssä tehty oletus, että sähkö on tuotettu uusiutuvalla energianlähteellä pitää paikkansa. Toisin sanoen, ainoastaan öljyn käytöstä aiheutuu ympäristöpäästöjä.

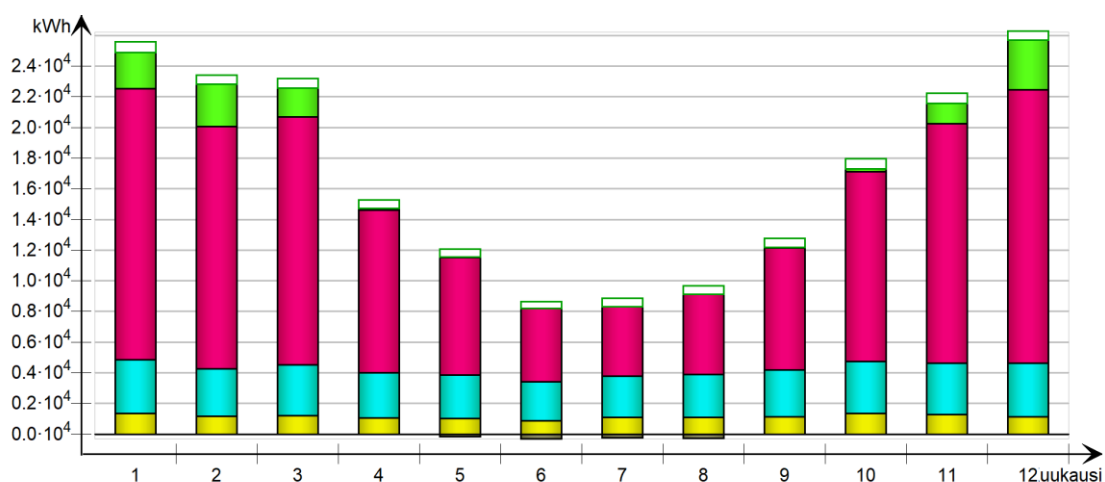
Järjestelmä tuottaa vuosittain n. 4,1 tn hiilidioksidia, jos käytetään samoja kertoimia kuin tässä työssä on aikaisemmin käytetty (Tilastokeskus, 2019). Vuoteen 2030 mennessä hiilidioksidipäästöjä syntyy yhteensä n. 45.1 tn. Päästöjä vähentyy verrattuna pelkästään öljylämmitysjärjestelmään $1018 - 45,1 \approx 972.9$ tn tai noin 96 %, mikä todella suuri osuus.

On myös syytä huomata, että maalämpöpumppu kattilahybridijärjestelmän kokonaispäästöt vuosina 2019 - 2030, ovat alle puolet siitä, mitä öljykattilajärjestelmä aiheuttaa päästöjä yhden vuoden aikana.

6.4 Aurinkopaneeli- maalämpöpumppukattilahybridijärjestelmä

Aurinkopaneeli- maalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmällä saadaan vuosittaiseksi energiankulutukseksi seuraavaa.

Kuukausittainen kokonaisenergia



Kuukausi	Kiinteistösähkö						Kiinteistö polttoaine (Lämpöarvo)		Asukkaan sähkö		Tuotettu sähkö	
	Valaistus, kiinteistö		LVI sähkö		Sähkölämmitys, kiinteistö		Fossiilinen polttoaine		Laitteet, asukas		Aurinkosähkön tuotanto	
	(kWh)	Kokonaisten ergia (kWh)	(kWh)	Kokonaisten ergia (kWh)	(kWh)	Kokonaisten ergia (kWh)	(kWh)	Kokonaisten ergia (kWh)	(kWh)	Kokonaisten ergia (kWh)	(kWh)	Kokonaisten ergia (kWh)
1	1125.0	1350.0	2901.0	3481.2	14725.0	17670.0	2336.0	2336.0	562.3	674.8	0.0	0.0
2	983.2	1179.8	2564.0	3076.8	13154.0	15784.8	2735.0	2735.0	491.6	589.9	0.0	0.0
3	989.2	1187.0	2749.0	3298.8	13477.0	16172.4	1848.0	1848.0	494.6	593.5	0.0	0.0
4	867.0	1040.4	2448.0	2937.6	8834.0	10600.8	87.3	87.3	433.5	520.2	-19.8	-23.7
5	845.3	1014.4	2355.0	2826.0	6359.0	7630.8	2.0	2.0	422.7	507.2	123.5	-148.2
6	713.7	856.4	2095.0	2514.0	3987.0	4784.4	0.2	0.2	356.8	428.2	259.4	-311.3
7	914.7	1097.6	2227.0	2672.4	3769.0	4522.8	0.1	0.1	457.4	548.9	202.6	-243.1
8	900.6	1080.7	2327.0	2792.4	4334.0	5200.8	0.4	0.4	450.3	540.4	233.4	-280.1
9	929.3	1115.2	2532.0	3038.4	6614.0	7936.8	2.3	2.3	464.6	557.5	-15.6	-18.7
10	1108.0	1329.6	2809.0	3370.8	10301.0	12361.2	167.5	167.5	554.1	664.9	-0.6	-0.7
11	1062.0	1274.4	2788.0	3345.6	12999.0	15598.8	1323.0	1323.0	531.0	637.2	0.0	0.0
12	930.5	1116.6	2916.0	3499.2	14857.0	17828.4	3213.0	3213.0	465.3	558.4	0.0	0.0
Yhteensä	11368.5	13642.2	30711.0	36853.2	113410.0	136092.0	11714.8	11714.8	5684.2	6821.0	-854.8	-1025.8

Kuva 13. Aurinkopaneeli- maalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmän vuosittainen energiankulutus

Kuten kuvasta nähdään, kokonaisenergiankulutus putoaa, verrattuna aikaisempiin järjestelmiin, mutta vain marginaalisesti. Kuva on hyvin samankaltainen, kuin pelkän maalämpöpumppu-kattilahybridijärjestelmän tapauksessa.

Taulukko 10. Aurinkopaneelimaalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmän vuosittainen ostoenergian kulutusraportti

	Käytetty energia		Ostoenergia		Tarve	Kokonaisenergia	
	kWh	kWh/m ²	kWh	kWh/m ²	kW	kWh	kWh/m ²
Valaistus, kiinteistö	13212	7.2	11368	6.2	6.61	13642	7.4
LVI sähkö	34918	19.0	30711	16.7	5.61	36853	20.1
Sähkölämmitys, kiinteistö	122381	66.7	113410	61.8	30.84	136092	74.2
Yhteensä, Kiinteistösähkö	170511	92.9	155489	84.8		186587	101.7
Fossiilinen polttoaine	11715	6.4	11715	6.4	34.71	11715	6.4
Yhteensä, Kiinteistö polttoaine*	11715	6.4	11715	6.4		11715	6.4
Yhteensä	182226	99.3	167204	91.1		198302	108.1
Laitteet, asukas	6606	3.6	5684	3.1	3.3	6821	3.7
Yhteensä, Asukkaan sähkö	6606	3.6	5684	3.1		6821	3.7
	Tuotettu energia		Myyty energia		Tuotettu		
Aurinkosähkön tuotanto	-16799	-9.2	-855	-0.5	-16.24	-1026	-0.6
CHP tuotto	0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0
Yhteensä, Tuotettu sähkö	-16799	-9.2	-855	-0.5		-1026	-0.6
Yhteensä	172033	93.8	172033	93.8		204097	111.2

Taulukosta 10 nähdään, että polttoaineen kulutus putosi alemmaksi kuin missään muussa järjestelmässä. Kyseessä on myös ainoa järjestelmä näistä kolmesta, mistä syntyi myös tuottoa.

6.4.1 Aurinkopaneeli-maalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmän kustannukset

Kuten maalämpöpumpun tapauksessa, investointi, tai huoltokustannuksia ei arvioida. On kuitenkin syytä todeta, että 150 kpl aurinkopaneeleja asennuksineen on todella merkittävä kustannus.

Polttoainekustannukset.

Kuten taulukosta nähdään, vuosittainen osto öljyn määrä on n. 11715 kWh tai 1171,5 €, eli noin puolet pienempi kuin maalämpökattilahybridin tapauksessa. Säästö alkuperäiseen tilanteeseen on yhteensä 44 000 l – 1171,5 l = 42828.5 l tai 42828.5 €.

Sähköenergian ostomäärä kyseisellä järjestelmällä on yhteensä 177117 kWh tai 26567.55 € mikä on enemmän kuin maalämpöpumpun tapauksessa. Syitä miksi sähkönkulutus nousi, vaikka järjestelmä on muuten sama, ja aurinkopaneelit eivät kuluta sähköä, ei selvinnyt tutkimuksessa.

Aurinkopaneelien tuottama sähkömäärä on 16799 kWh, mikä käytetään kohteessa, ja 855 kWh tai 128 €, mikä myydään eteenpäin. Aurinkopaneelien tuottama sähkö mukaan huomioiden sähkönkulutus järjestelmällä on 177117 kWh – 16799 kWh – 855 kWh = 159463

kWh tai 23919,45 €. Eli säästöä verrattuna maalämpöpumppuhybridiin on 25571,35 € - 23919,45 € = 1651,9

6.4.2 Aurinkopaneeli- maalämpöpumppukattilahybridijärjestelmän ympäristövaikutukset

Järjestelmä tuottaa vuosittain n. 2.47 tn hiilidioksidia. Vuoteen 2030 mennessä hiilidioksidipäästöjen määrä on n. 27.1 tn, mikä on noin 40 % maalämpöhybridin tapauksesta. Öljyjärjestelmään verrattuna päästövähennys on n. 1018 tn – 27.1 tn = 990.9 tn tai noin 97.5 %

6.5 Ilmavesilämpöpumppujärjestelmän kannattavuuslaskenta

Kannattavuuslaskenta on tehty käyttämällä kahta kappaleessa 3.7 käytettyä menetelmää. Molemmissa menetelmissä investointi on diskontattu.

Kannattavuuslaskennassa on otettu huomioon seuraavat asiat:

- Investoinnit tehdään vuoden alussa ja ne maksetaan kerralla.
- Investoinnin elinikä on 15 vuotta. (Laskelmat tehdään vuoteen 2035 asti)
- Investointia varten ei oteta lainaa
- Öljyn hinta pysyy vuodesta toiseen samana.
- Sähkön hintaan tulee vuosittain 4 % korotus ($f_e = 4\%$)
- Huolto ja käyttökustannukset (energiankulutus sekä rakennuksen lämmöntarve) eivät muutu seuraavina vuosina.
- Korkotaso on 10 %

Takaisinmaksumenetelmä

Takaisinmaksuaikamenetelmässä on käytetty kaavaa 2

Alla on esitetty takaisinmaksumenetelmässä käytettyjä parametrejä taulukkomuodossa:

Taulukko 11. Takaisinmaksuajan parametrit

	€	%
I_0	44000	
A_k	18014,2	
i		10

Kyseisillä arvoilla takaisinmaksuajaksi tulee:

$$N = \frac{\ln\left(1 - \frac{44000 \text{ €}}{18014,2 \text{ €}} \cdot 0,1\right)}{\ln\left(\frac{1}{1+0,1}\right)} \approx 2,93 \rightarrow 3 \text{ yr} \quad (6)$$

Investointi maksaa itsensä siis takaisin vuoden 2022 aikana, tai alle kolmen vuoden päästä investoinnista. Tämä on investointianalyysin kannalta hyvin lyhyt aika. Investointi on siis takaisinmaksumenetelmällä katsottuna erittäin kannattava.

Nykyarvomenetelmä

Nykyarvomenetelmän laskennassa on käytetty seuraavaa kaavaa (7) (Sirén, 2016)

$$P = \sum_{k=1}^N \frac{T_{\bar{o}}}{(1+i)^k} - \sum_{k=1}^N \frac{K_{s\bar{a}}}{(1+r_e)^k} - \sum_{k=1}^N \frac{K_h}{(1+i)^k} - \sum_{k=1}^N \frac{I_0}{(1+i)^k} + \sum_{k=1}^N \frac{S}{(1+i)^N}, \quad (7)$$

missä, $T_{\bar{o}}$ on öljynkulutuksen pienenemisestä aiheutuva säästö
 $K_{s\bar{a}}$ on sähkön ostokustannukset
 K_h on huoltokustannukset
 S on investoinnin jäännösarvo

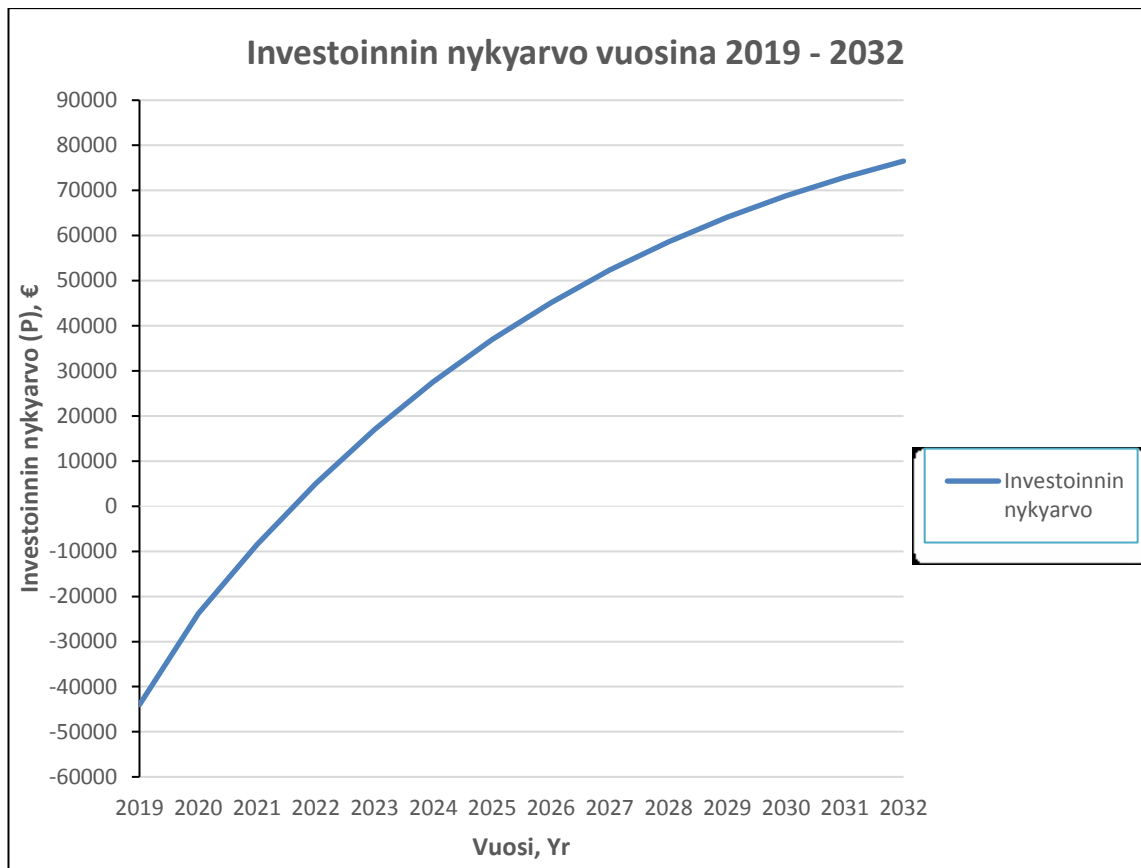
$T_{\bar{o}}$ lasketaan ottamalla erotus pelkällä öljykattilalämmityksellä, sekä lämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmällä kuluvan öljyn määrästä, eli 44 000 € - 15653 € = 28347 €. Samalla tavalla sähkönostohinnan, $K_{s\bar{a}}$ korotuksessa on laskettu erotus kahden eri järjestelmän välillä ensimmäisenä vuonna, eli 195648 € - 9432 € = 10132 €. Kyseistä arvoa käytetään sähkön diskonttauksessa. Sähkön hinta diskontataan todellisella korkokertoimella. Todellinen korkotas r_e sähkön hinnalle, on laskettu kaavalla 5, missä f_e on 4 %

Taulukossa 12 on esitetty nykyarvolaskennassa käytetyt parametrit.

Taulukko 12. Nykyarvomenetelmän parametrit

	Vuosi	€	%
N	15		
k	1		
T		28347	
$K_{s\bar{a}}$		-10132,8	
K_h		-1000	
I_0		-41000	
S		8200	
i			10
r_e			5,77

Kuvassa 15 on esitetty investoinnin nykyarvo, alkaen vuodesta 2019, vuoteen 2032 asti.



Kuva 14. Investoinnin nykyarvo vuosina 2019 - 2032

Kyseiset P-arvot tarkoittavat investoinnin nykyarvoa kyseisen vuoden lopussa. Kuten kuvaajasta 14 nähdään, investoinnin nykyarvo, on positiivinen jo vuonna 2022, mikä tekee investoinnista todella kannattavan myös nykyarvomenetelmällä. Itseasiassa, jotta investointi ei maksaisi itseään takaisin käyttöikänsä aikana, korkokertoimen tulisi olla yli 65 %, mikä on todella epätodennäköistä.

7 Johtopäätökset

Seuraavassa esitetään simulointituloksista tehtyjä päätelmiä sekä arvioidaan tapauskohtaisen tutkimuksen onnistumista sekä mahdollisia virheitä.

7.1 Yhteenveto analyysituloksista

Analyysin perusteella hybridijärjestelmät pienentävät polttoaineen kulutusta järjestelmästä riippumatta merkittävästi. Suunniteltavalla ilmavesilämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmällä saatiin analysoinnissa päästöt ja polttoainekustannukset pienemmään lähes kolmannekseen alkuperäiseen öljylämmitysjärjestelmään verrattuna. Lisäksi kyseisen järjestelmän investointi on sekä nykyarvo-, että takaisinmaksuaikamenetelmällä arvioituna erittäin kannattava.

Kahden teoreettisen järjestelmän tapauksessa päästö- ja polttoainevähennykset verrattuna öljylämmitysjärjestelmään olivat huomattavat. Maalämpöpumppu- kattilahybridijärjes-

telmässä polttoaineen kulutus pieneni noin 90 % verrattuna kattilajärjestelmään. Aurinkopaneeli-lämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmällä päästöt ja kulutus pienenevät jopa yli 95 % öljylämmitysjärjestelmästä.

7.2 Virheiden analysointi

Suurimmat virheet työssä muodostuivat lähtötietojen puutteellisuudesta. Rakennus on rakennettu, ennen kuin nykymuotoisia rakennusmääräyksiä on otettu käyttöön, joten erityisesti seinärakenteiden tapauksessa, oli seinän ominaisuudet arvioitava. Tämän lisäksi koulusta ei löytynyt ajankohtaisia LVI-suunnitelmia, ja vanhoissa suunnitelmissa oli puutteita.

Koulurakennuksen mallinuksessa virheitä muodostivat ainakin rakennuksen geometria, käyttöajat, sekä tarkkojen rakennetyyppien puuttuminen. Tämän lisäksi ikkunatyypit, koot ja paksuudet eivät ole todellisuutta vastaavat. Vuosittainen aurinkosäteily määrä kohteessa on myös vuodelta 2012, millä saattaa olla vaikutuksia simuloinnin tuloksiin.

Myöskään rakennuksen lämpökuormat eivät olleet täysin todenmukaisia. Koululaisten lämpökuorma vaihtelee hyvin paljon vuoden aikana riippuen aktiviteeteista ja oppilaiden iästä (pienempi henkilö tuottaa pienemmän lämpökuorman). Lisäksi koulun käyttölaitteisto, sekä valaistus vaihtelee hyvin paljon tilakohtaisesti, ja siksi keskimääräinen pinta-alan suhteutettua lämpökuormaa on hieman harhaanjohtavaa käyttää.

Pikkukoulun erottaminen mallista myös tuloksiin epätarkkuutta. Vaikka lämpöhäviöt ja energiankulutus pikkukoulussa on pientä, on tällä vaikutusta tuloksiin.

Rakennuksen käyttöaikojen asettelussa oli myös puutteita. Rakennuksen lomapäiviksi (ajoiksi, milloin käyttöä ei ole) asetettiin Ruotsin kalenterin mukaiset vapaapäivät. Syinä tähän oli se, että vastaavaa Suomen mukaisia vapaapäiviä ei ohjelmiston tietopankista löytynyt.

Käyttöveden kulutuksen osalta mallintaminen oli myös melko tarpeetonta, koska käyttöveden kulutukseksi arvioitiin kiinteä kuutiomäärä. Näin ollen raportissa ilmenevä käyttöveden kulutus ei ole millään tavalla simuloitu.

IDA-ICE- ohjelmistolla luodut hybridijärjestelmät ei olleet täysin realistisia monelta osin. Esimerkiksi kaikissa järjestelmissä on oletettu, että rakennuksen vesiputkien siirtohäviöt ovat vakiot. Todellisuudessa siirtohäviöt vaihtelevat putkikoon, virtaavan nesteen lämpötilan ja ympäröivän tilan lämpötilan mukaan. Mallissa ei myöskään otettu huomioon putkistojen pituuksia.

Ilmavesilämpöpumpun tapauksessa mallinnuksen tarjoamat hyödyt eivät myöskään välttämättä itsessään tarjoa mitään uutta tietoa, koska vastaava energiasäästö olisi konkreettisesti mitattavissa. Esimerkiksi hieman poiketen normaalisti hybridijärjestelmän mitoittamisessa lämpöpumpun teho on mitoitettu ensiksi perustuen ulkopuolisen toimittajan valitsemiin mitoitusolosuhteisiin. Näin ollen tämä tapaustutkimus ei osoittanut sitä, onko etukäteen mitoitettu lämpöpumppu juuri optimaalinen tähän käyttökohteeseen.

Maalämpöpumpun tapauksessa epätarkkuuksia aiheuttavat erityisesti maaperän ominaisuuksien yleistäminen. Todellisuudessa Kalaholman koulun maaperä ei välttämättä ole edes mallinuksessa käytettyä (sorapohja) vaan jotain aivan muuta. Porattavien kaivojen

määrä ja ominaisuudet myös yleistettiin. Lisäksi mahdollisia esteitä porakaivojen sijainneille ei pohdittu sen tarkemmin.

Aurinkopaneelien tapauksessa epätarkkuus mallissa on kaikista selkein. Kalaholman koulun katto on todellisuudessa vinokatto, mutta mallin yksinkertaisuuden vuoksi päädyttiin käyttämään tasakattoa. Näin ollen aurinkopaneelien suuntaukset ja sijoitukset eivät vastanneet edes teoriassa todellista tilannetta. Tasakaton käyttö oikeutettiin kuitenkin tässä työssä siitä syystä, että aurinkopaneelien perustuvien hybridijärjestelmien implementointi tähän kohteeseen tehtiin ainoastaan teoreettisesti. Käytännössä Vinokaton piirtäminen tuotuun IDA-ICE tuotuun BIM-malliin on haastavaa, eikä MagiCAD-Room tarjoa vinokaton piirtomahdollisuutta lainkaan.

Teoriaosuuden osalta luotettavaa tietoa löytyi runsaasti, sillä vastaavaa tutkimusta on tehty monen eri organisaation ja tutkijan toimesta. Teoriataarkastelu ei kuitenkaan ratkaissut hybridijärjestelmien mallinuksen haasteita. Vaikka lähtökohta kaikille hybridijärjestelmille teorianpohjalta on, että ympäristövaikutukset ovat kauttaaltaan positiiviset, valitettavasti teorian pohjalta ei voida luoda mitään tarkkaa mallia siitä, kuinka suuret säästöt eri kohteissa ovat.

Kaiken kaikkiaan malli on kuitenkin riittävän tarkka. IDA-ICE ohjelmiston energiankulutusta simuloinnilla, pelkällä öljylämmitysjärjestelmällä saatiin öljynkulutukseksi melko lähelle todellista kulutusta vastaava lukema. Tämän perusteella onkin syytä olettaa, että rakennuksen lämmönkulutus on riittävän lähellä todellisuutta, ja hybridijärjestelmien simulointi antoi realistisia tuloksia, joita voidaan pitää luotettavina. Ainoa epätarkkuutena ilmennyt asia oli se, että sähkön kulutus nousi aurinkopaneeli- maalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmällä, verrattuna, pelkään maalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmään, vaikka oletettavasti sen tulisi pysyä samana, tai mahdollisesti jopa pienentyä.

Tutkimustuloksista huomattiin myös se, että järjestelmien toiminnan analysointi tulee lähtökohtaisesti suorittaa aina rakennuskohtaisesti, vaikka mallissa ilmenisikin pieniä epäloogisuuksia. Tämä vie valitettavan usein aikaa ja vaivaa, varsinkin kun ei suoraan voida sanoa, mistä virheellinen tulos johtuu, vai onko kyseessä virhe ylipäättään.

Tämä tutkimuksen pohjalta ei voida sanoa, voisiko tulevaisuudessa ohjelmistokehityksellä tai ohjelmoinnilla mahdollisesti generalisoida hybriditekniikoiden kannattavuuden tarkastelua vielä tehokkaammin. Tätä voisi tutkia erityisesti energia, LVI- ja tietotekniikkainsinöörien yhteistyönä.

8 Yhteenveto

Tässä työssä tutkittiin hybriditekniikoiden hyödyntämistä lämmöntuotannossa. Teoriataarkastelun ja tapauskohtaisen tutkimuksen perusteella hybriditekniikat ovat taloudellinen ja ympäristölle ystävällinen vaihtoehto nopealla aikavälillä päästövähennyksiä ja säästöjä haettaessa. Erityisesti lämpöpumpputekniikkaa hyödyntävät hybridijärjestelmät osoittautuvat erittäin kannattavaksi.

Kalaholman koulun tapauksessa ilmaresilämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmällä saatiin konkreettisesti hyötyä niin säästöissä, kuin päästövähennyksissäkin. Koska suunnit-

tellun ilmavesilämpöpumpun arvioitu takaisinmaksuaika on vain n. 2 – 3 vuotta, on selvää, että sen hankkiminen on kannattavaa jopa tilanteessa, missä Kalaholman koulu puretaan vuoteen 2025 mennessä.

Ilmavesilämpöpumppukattilahybridijärjestelmällä saadaan päästöjä laskettua kolmannekseseen nykytilanteesta. Päästöjä tulisi kuitenkin rajoittaa tai sitoa vielä lisää, mikäli skaalattaisiin koko Porin päästötavoitteet koulurakennukselle. Päästöjen verrattain merkittävä pudotus todetaan kuitenkin riittäväksi, varsinkin kun koulun ensisijainen tavoite oli puolittaa öljynkulutuksesta aiheutuvat vuosittaiset kustannukset.

Maalämpöpumppukattilahybridijärjestelmän tapauksessa päästö- ja polttoaineen kulutus pieneni huomattavasti enemmän kuin ilmavesilämpöpumpun tapauksessa. Maalämpöpumpulla päästiin tarkasteluaikana jopa 95 % päästövähennyksiin verrattuna öljylämmitysjärjestelmään

Aurinkopaneelimaalämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmän tapauksessa säästöt olivat vain marginaalisesti paremmat, kuin maalämpöpumppu -kattilahybridijärjestelmän tapauksessa. Järjestelmällä päästiin n. 97 % päästövähennyksiin, mutta ei kuitenkaan täysin päästöttömään järjestelmään

Vaikka varsinaista investoinnin kannattavuuslaskentaa ei tehty muille järjestelmille kuin ilmavesilämpöpumppu- kattilahybridijärjestelmälle, on selvää, että aurinkopaneelien tapauksessa investointi ei vaikuta kannattavalta. 150 kpl aurinkopaneeleja tulee olemaan todella kallis investointi suhteessa sen tarjoamaan säästöihin. Sen sijaan maalämpöpumpun tapauksessa investointi voi mahdollisesti olla kannattava.

Tuloksista ilmeni, että hybridijärjestelmät ovat kuitenkin yleisesti toimiva ratkaisu lyhyen aikavälin päästövähennyksiä ajatellen ja kustannuksellisesti erityisesti kohteissa, missä on lämmitysmuotona pelkästään öljylämmitys. Investointi on n. 100 – 200 kW tehotarpeen luokan järjestelmissä yleisesti erittäin kannattava.

Erityisesti ilmalämpöpumpun osalta investointien takaisinmaksuajat ovat realistia ja vuosittainen energiassa säästetty määrä on merkittävä. Tämän lisäksi ympäristövaikutukset putosivat molemmissa tapauksissa merkittävästi.

Lähdeluettelo

- Cai, J.;Li, Z.;& Zhou, F. (2019). Performance analysis of a novel air source hybrid solar assisted heat pump. *Renewable Energy*, 1133-1145.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.134>
- Chow, T. (2010). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*, 365-379.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.037>
- Dannemand, M.;Perers, B.;& Furbo, S. (2019). Performance of a demonstration solar PVT assisted heat pump system with cold buffer storage and domestic hot water storage tanks. *Energy & Buildings*, 46-57.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.042>
- energiatoteellisuus. (8. Elokuu 2018). Sähkönkäyttö kunnittain 2007 - 2017. Noudettu osoitteesta
https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/sahkonkaytto_kunnittain_2007-2017.html
- Energiavirasto. (2019). Voimalaitosrekisteri. Pori.
- Equa. (2019). IDA Indoor Climate and Energy. *IDA indoor Climate and Energy*. Haettu 2019 osoitteesta <https://www.equa.se/fi/ida-ice>
- Frisk, M. (Tammikuu 2017). Simulation and Optimization of a Hybrid Renewable Energy System for application on a Cuban farm. Uppsala, Ruotsi.
- Heinen, S.;Burke, D.;& O'Malley, M. (2016). Electricity, gas, heat integration via residential hybrid heating technologies - An investment model assessment. *Energy*, 906-919. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.126>
- Ilmatieteenlaitos. (ei pvm). Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa. Noudettu osoitteesta <https://ilmatieteenlaitos.fi/energialaskennan-testivuodet-nyky>
- Jeong, Y.-d.;Gyung Yu, M.;& Nam, Y. (21. Elokuu 2017). Feasibility Study of a Heating, Cooling and Domestic Hot Water System Combining a Photovoltaic-Thermal System and a Ground Source Heat Pump. *energies*, 1-29.
doi:<https://doi.org/10.3390/en10081243>
- Kaufman, A. C. (2. Lokakuu 2017). The World's First Power Plant To Combine Hydro And Solar Opens In Portugal. New York, New York, Yhdysvallat. Noudettu osoitteesta <https://futurism.com/the-worlds-first-power-plant-combining-hydroelectricity-and-solar-energy-is-now-open>
- Kiviluoma, J.;Heinen, S.;Qazi, H.;Madsen, H.;Strbac, G.;Kang, C.; . . . Naegler, T. (2. Helmikuu 2017). Harnessing Flexibility from Hot And Cold - Heat Storage and Hybrid systems Can Play a Major Role. *IEEE power & energy magazine*, 25-33.
doi:10.1109/MPE.2016.2626618

- Koljonen, T.; Soimakallio, S.; Lehtilä, A.; Similä, L.; Honkatukia, J.; Hildén, M.; . . . Vainio, T. (2019). *Pitkän aikavälin kokonaispäästökehitys*. Helsinki: Valtioneuvoston kanslia 28.02.2019. Noudettu osoitteesta <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-656-0>
- Laitinen, A.; Tuominen, P.; Holopainen, R.; Tuomaala, P.; Jokisalo, J.; Eskola, L.; & Sirén, K. (2014). *Renewable energy production of Finnish heat pumps*. Espoo: VTT. Noudettu osoitteesta <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2014/T164.pdf>
- Lamnatou, C.; & Chemisana, D. (7. Joulukuu 2016). Photovoltaic/thermal (PVT) systems: A review with emphasis on environmental issues. *Renewable Energy*, 271-285. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.009>
- Majuri, P. (2016). Ground source heat pumps and environmental policy: The Finnish practitioner's point of view. *Journal of Cleaner Production*, 740-749. doi:DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.08.017
- Mancarella, P. (1. Helmikuu 2014). MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models. *Energy*, 1-17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.041>
- Manolis, S.; Nektarios, A.; Giorgos, P.; & Angeliki, K. (2018). Experimental study and Life Cycle Assessment (LCA) of Hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) solar systems for domestic applications. *Renewable Energy* 126, 708-723. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.011>
- Minsta Do Anjo, A.-C.; Levêque, G.; Holaind, N.; Henry, G.; & Leroux, A. (2019). Low temperature and power solar energy conversion for domestic use. *Energy Procedia* 161, 454-463. doi:DOI: 10.1016/j.egypro.2019.02.072
- Neste. (2019). Laske lämmitysöljyn hinta ja tilaa lämpöä kotiin. Noudettu osoitteesta <https://www.neste.fi/lammitysoljytilaus>
- Neste Oil. (2019). Näin öljypoltin ja kattila pysyvät kunnossa. Noudettu osoitteesta <https://www.neste.fi/oljypoltin-ja-kattila-hoito>
- PB. (June 2017). BP Statistical Review of World Energy. Noudettu osoitteesta <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>
- Peda. (2019). Kalaholman Koulu. Pori. Noudettu osoitteesta <https://peda.net/pori/perusopetus/koulujen-kotisivut/pl1/kalaholmankoulu/k>
- Porin energia. (2019). Aurinkosähköjärjestelmä Pori Energialta. Pori. Noudettu osoitteesta https://www.porienergia.fi/Tuotteet-ja-palvelut/Aurinkosahko/#.XOVjT_5S-00
- Porin Kaupungin Ympäristövirasto. (ei pvm). Suomen Ensimmäinen Aurinkoenergiauimahalli. Pori. Noudettu osoitteesta http://solarforum.fi/wp/wp-content/uploads/2014/06/pori_uimahalli_esite.pdf

- Porin Kaupunki. (2015). *Porin Kaupungin rakennusjärjestys*. Rakennusmääräys, Pori. Noudettu osoitteesta
https://www.pori.fi/sites/default/files/atoms/files/rakennusjarjestys_2019_1.pdf
- Porin Kaupunki. (2016). Kohti Hiilineutraalia poria. Pori. Noudettu osoitteesta
<https://www.pori.fi/kohti-hiilineutraalia-poria>
- Porin Kaupunki. (2019). *Palveluverkkoselvitys*. Pori: Porin Kaupunki. Noudettu osoitteesta
https://www.pori.fi/sites/default/files/atoms/files/palveluverkkoselvitys_14.2.2019.pdf
- Porin Kaupunki. (2019). Porin kaupungin verkkosivut. Pori. Noudettu osoitteesta
<http://www.porinkaupunki.fi>
- Radio Pori. (12. Lokakuu 2017). Kalaholman koulu jatkuvan ilkvallan kohteena - vuoden aikana rikottu. Pori. Noudettu osoitteesta
<https://www.radiopori.fi/uutiset/kalaholman-koulu-jatkuvan-ilkvallan-kohteena-vuoden-aikana-rikottu-48-ikkunaa>
- Reda, F.;& Laitinen, A. (30. Lokakuu 2015). Different strategies for long term performance of SAGSHP to match residential energy requirements in cold climate. *Energy and Buildings* 86, 557-572. doi:DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.10.056
- Ruokamo, E. (2016). Household preferences of hybrid home heating systems—A choice experiment application. *Energy Policy*, 224-237. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.04.017>
- Safijahansa, E. (12. Tammikuu 2019). Performance simulation of combined heat pump with unglazed transpired solar collector. *Solar Energy*, 575-593. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.038>
- Satakunnan kansa. (2018). Technip solmi lopullisen kauppasopimuksen Lammin tuulipuiston rakentamisesta – työllisyysvaikutus Mäntyluotoon 50–60 henkilötyövuotta. Satakunta. Noudettu osoitteesta
<https://www.satakunnankansa.fi/satakunta/technip-solmi-lopullisen-kauppasopimuksen-lammin-tuulipuiston-rakentamisesta-tyollisyysvaikutus-mantyluotoon-50-60-henkilotyovuotta-200732585>
- Sirén, K. (Lokakuu 2016). LIFE-CYCLE CALCULATION OF BUILDING ENERGY INVESTMENTS. Espoo: Aalto University. Noudettu osoitteesta
https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/373921/mod_resource/content/1/LCC%20calculation_Oct_2016.pdf
- Suomen Hallitus. (2016). *Hallituksen esitys eduskunnalle Pariisin sopimuksen hyväksymisestä ja sopimuksen lainsäädännön alaan kuuluvien määräysten*

voimaansaattamisesta. Helsinki: Finlex. Noudettu osoitteesta
<https://www.finlex.fi/fi/esitykset/he/2016/20160200>

Suomen Kalenterit Oy. (2019). LVI-Kalenteri 2019. Helsinki: Helsingin yliopisto.

Suomen Tuulivoimayhdistys. (2019). Wind Farms and Projects in Finland 2019. Noudettu osoitteesta <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/en/wind-power-in-finland/wind-power-projects-in-finland/wind-power-projects-in-finland>

Taehoon, K.;Byung-Il, C.;Yong-Shik, H.;& Hyung Do, K. (11. Heinäkuu 2018). A comparative investigation of solar-assisted heat pumps with solar thermal collectors for a hot water supply system. *Energy Conversion and Management*, 472-484. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.035>

Tamvakidis, S.;Firiris, V. K.;Martzopoulou, A.;Fragos, V. P.;& Kotsopoulos, T. A. (2015). Performance evaluation of a hybrid solar heating system for farrowing houses. *Energy and Buildings*, 162-174. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.002>

Tilastokeskus. (2018). Energian Hankinta ja Kulutus [verkkojulkaisu 2017]. Helsinki, Suomi. Noudettu osoitteesta <http://www.stat.fi/til/ehk/>

Tilastokeskus. (2019). Polttoaineluokitus. Noudettu osoitteesta
https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html

Wang, F.-C.;& Chen, H.-C. (2015. Toukokuu 2016). The development and optimization of customized hybrid power systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, ss. 12261-12272. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.247>

Wang, J.;Xu, D.;Ma, G.;& Zhou, J. (2018). A Simple Multimode Hybrid Energy Storage System and fractional order control strategy. *Energy Procedia*, 532-537. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.206>

Wogan, D.;Oradhan, S.;& Albardi, S. (2017). *GCC Energy System Overview - 2017*. Riyadh: King Abdullah Petroleum Studies and Research Center. Noudettu osoitteesta <https://www.kapsarc.org/research/publications/gcc-energy-system-overview-2017/>

Liiteluettelo

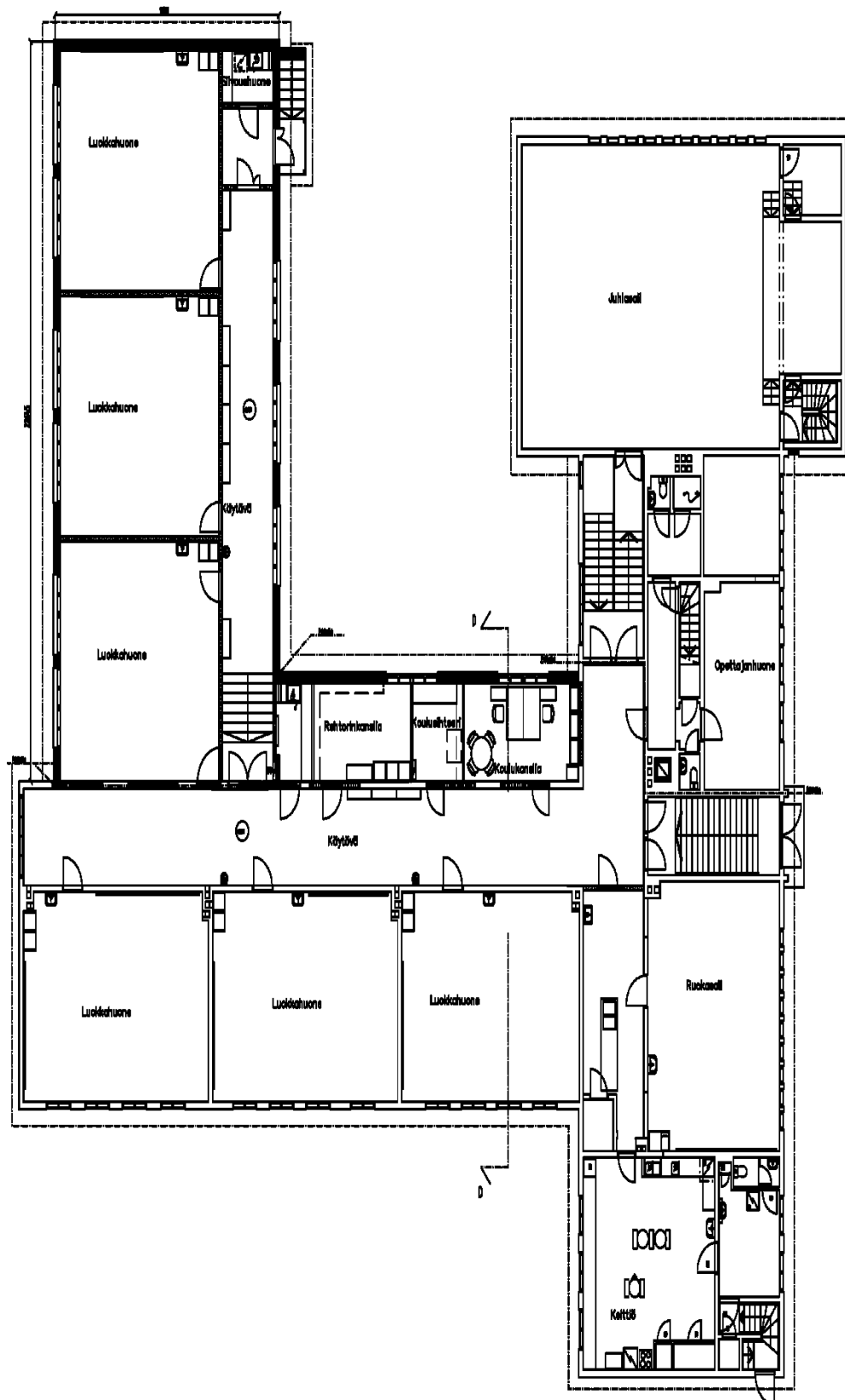
Liite A1. Kalaholman koulun arkkitehtipohja, yläkerta. 1 sivu.

Liite A2. Kalaholman koulun arkkitehtipohja, alakerta. 1 sivu.

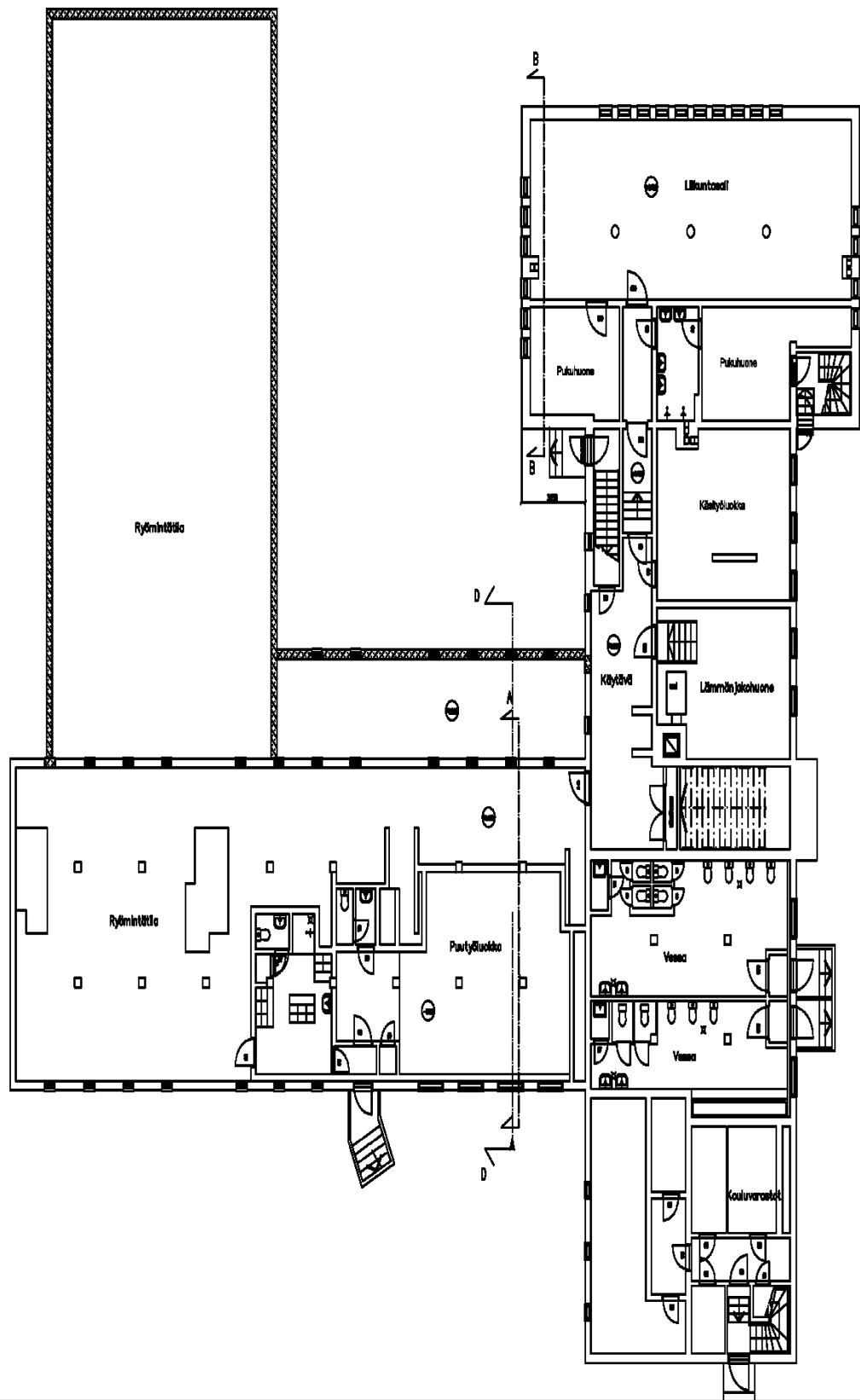
Liite B1. Kalaholman koulun öljylämmitysjärjestelmä. 1 sivu.

Liite B2. Kalaholman koulun uusi lämmitysjärjestelmä. 1 sivu.

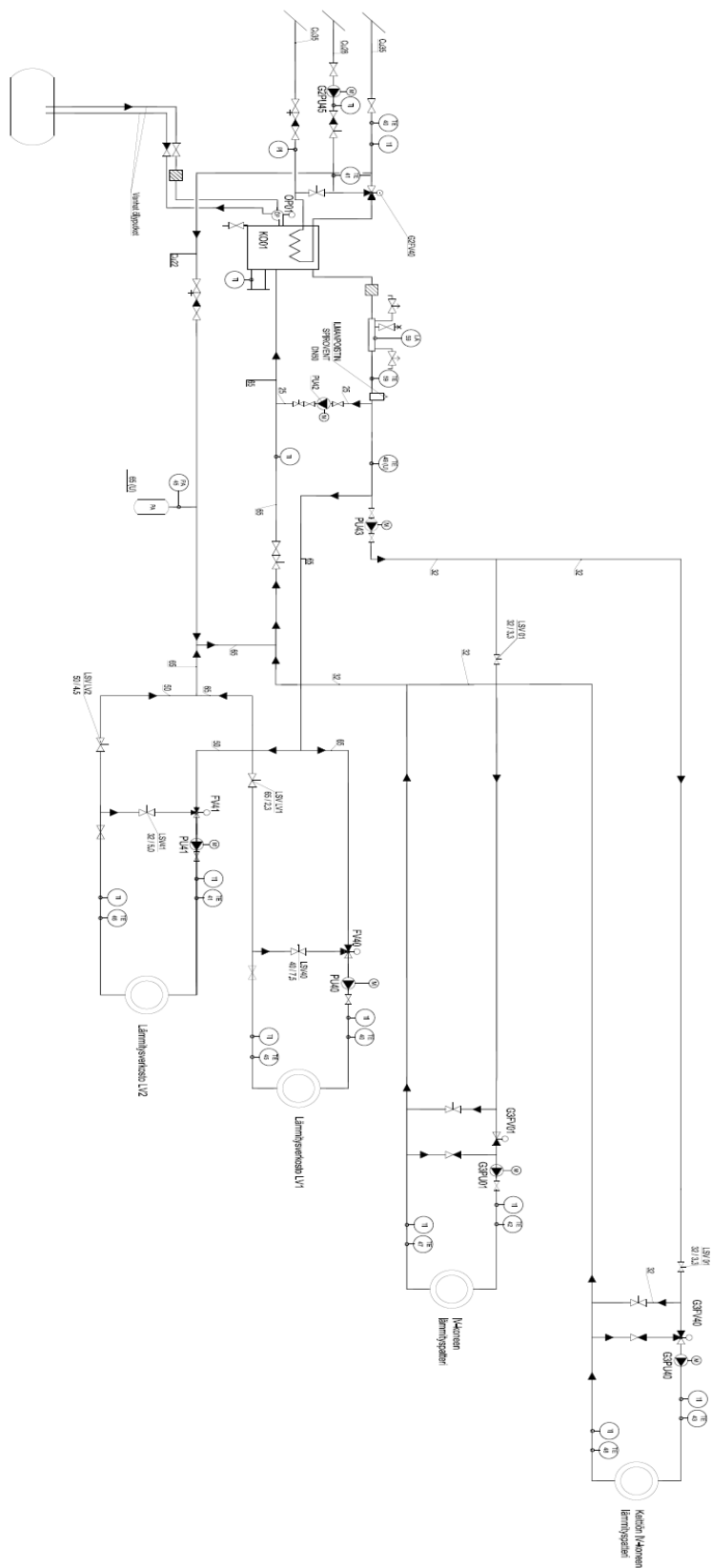
Liite A1. Kalaholman koulun arkkitehtipohja, yläkerta



Liite A2. Kalaholman koulun arkkitehtipohja, alakerta



Liite B1. Kalaholman koulun öljylämmitysjärjestelmä



Liite B2. Kalaholman koulun uusi lämmitysjärjestelmä

